N° D'ORDRE
168

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE LYON

POUR OBTENIR
LE TITRE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE LYON
(Mention Sciences)

par

Jean-Claude MANARANCHE
Ingénieur de l'Ecole Centrale Lyonnaise
Ingénieur-Collaborateur au Centre National de la Recherche Scientifique

---

PREMIÈRE THÈSE. — CONTRIBUTION A L'ÉTUDE THERMIQUE DES FOURS A VIDE.

DEUXIÈME THÈSE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le 20 Octobre 1960 devant la Commission d'Examen

MM. BERNARD . . . . . Président.
BOUTILLIER . . . . . Examinateurs
EYRAUD . . . . . —

EDITIONS DE L'A. G. E. L
20, Rue François-Garcin — LYON
1960

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41550016_0031

N° D'ORDRE
168

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE LYON

POUR OBTENIR
LE TITRE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE LYON
(Mention Sciences)

par

Jean-Claude MANARANCHE
Ingénieur de l'Ecole Centrale Lyonnaise
Ingénieur-Collaborateur au Centre National de la Recherche Scientifique

---

PREMIÈRE THÈSE. — CONTRIBUTION A L'ÉTUDE THERMIQUE DES FOURS A VIDE.

DEUXIÈME THÈSE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le 20 Octobre 1960 devant la Commission d'Examen

MM. BERNARD . . . . . Président.
BOUTILLIER . . . . . Examinateurs
EYRAUD . . . . . —

EDITIONS DE L'A. G. E. L
20, Rue François-Garcin — LYON
1960

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

UNIVERSITE DE LYON - FACULTE DES SCIENCES

Doyens honoraires

MM. LONGCHAMBON DOUIN MOUSSA

Professeurs honoraires

MM. LOCQUIN, de LARAMBERGUE, DOEUVRE, SOLLAUD, MENTZER, MOUSSA.

Doyen

M. GAUTHIER H.

Assesseur

M. PRETTRE

Professeurs

MM. LONGCHAMBON	Minéralogie
DOUIN	Botanique
GAUTHIER	Géologie
DEJARDIN	Physique générale
EYRAUD Henri	Calcul différentiel et intégral
PRETTRE	Chimie industrielle
COURTY	Chimie-physique
KUHNER	Microbiologie et mycologie
CORDIER	Physiologie
MALECOT	Mécanique rationnelle et appliquée
PARIS	Chimie minérale
AUMERAS	Chimie
COLONGE	Chimie organique
JANIN	Physique générale
FLANDRIN	Géologie appliquée
BERNARD René	Physique industrielle
DUFAY Jean	Astronomie
NIGON	Zoologie expérimentale
VIRET	Géologie
WAUTIER	Zoologie
CHOPIN	Chimie biologique
BRACONNIER	Mathématiques
CUEILLERON	Chimie
EYRAUD Charles	Chimie minérale
BOUTILLIER	Minéralogie
BOIDIN	Botanique
JAFFARD	Mathématiques
MESNARD	Physique

UNIVERSITE DE LYON - FACULTE DES SCIENCES

Doyens honoraires

MM. LONGCHAMBON DOUIN MOUSSA

Professeurs honoraires

MM. LOCQUIN, de LARAMBERGUE, DOEUVRE, SOLLAUD, MENTZER, MOUSSA.

Doyen

M. GAUTHIER H.

Assesseur

M. PRETTRE

Professeurs

MM. LONGCHAMBON	Minéralogie
DOUIN	Botanique
GAUTHIER	Géologie
DEJARDIN	Physique générale
EYRAUD Henri	Calcul différentiel et intégral
PRETTRE	Chimie industrielle
COURTY	Chimie-physique
KUHNER	Microbiologie et mycologie
CORDIER	Physiologie
MALECOT	Mécanique rationnelle et appliquée
PARIS	Chimie minérale
AUMERAS	Chimie
COLONGE	Chimie organique
JANIN	Physique générale
FLANDRIN	Géologie appliquée
BERNARD René	Physique industrielle
DUFAY Jean	Astronomie
NIGON	Zoologie expérimentale
VIRET	Géologie
WAUTIER	Zoologie
CHOPIN	Chimie biologique
BRACONNIER	Mathématiques
CUEILLERON	Chimie
EYRAUD Charles	Chimie minérale
BOUTILLIER	Minéralogie
BOIDIN	Botanique
JAFFARD	Mathématiques
MESNARD	Physique

Ce travail a été réalisé au Laboratoire d'Optique Electronique et de Physique du Métal sous la direction de Monsieur le Professeur René BERNARD auquel je tiens à exprimer ici ma profonde reconnaissance.

Il m'a été infiniment précieux de recevoir ses conseils, ses suggestions, ses critiques, comme de cotoyer cette équipe de chercheurs auxquels il excelle à faire partager son goût des solutions élégantes et rationnelles.

Je remercie Messieurs les Professeurs BOUTILLIER et EYRAUD pour leur participation à mon jury de thèse.

Je tiens en leur rappelant ma très vive sympathie, à remercier mes camarades du Laboratoire, Techniciens et Mécaniciens, pour la collaboration fructueuse qu'ils m'ont toujours apportée avec la plus parfaite gentillesse.

PREMIERE THESE

CONTRIBUTION A L'ETUDE THERMIQUE DES FOURS A VIDE

PLAN

	Pages
I - INTRODUCTION	1
II - GENERALITES SUR LE FOUR	3
A) Description	3
- le groupe à vide élevé	
- le four proprement dit	
- l'installation électrique	
B) Calculs préliminaires	18
- l'élément chauffant	
- le groupe à vide élevé	
III - ETABLISSEMENT DES EQUATIONS	23
a) Rappel des lois de rayonnement	23
b) Cas de deux cylindres coaxiaux fermés	24
c) Cas particulier du four	29
IV - COMPTE-RENDU DES ESSAIS REALISES	33
a) Essais de fonctionnement	33
- essais de vide	
- essais de chauffage	
b) Etudes thermiques	43
- étude du gradient de température	
- etude de l'influence du nombre des écrans	
V - CALCUL DES COEFFICIENTS DE RAYONNEMENT MUTUEL	57
a) Séparation des pertes par conductibilité et rayonnement	57
b) Etude du rayonnement mutuel des écrans	59
c) Calcul du gradient de température	62
d) Etude du rayonnement de la région centrale	65
VI - ESSAI DE GENERALISATION ET CONCLUSION	71
a) Application à un four de capacité plus grande	71
b) Extrapolation à une température supérieure	73

I

INTRODUCTION

Les nombreuses études entreprises depuis plusieurs années par le Laboratoire de Physique du métal dans le domaine des fours électriques de frittage sous vide élevé ont maintes fois mis en évidence les lacunes théoriques qui existent dans ce domaine. La part laissée à l'empirisme est grande dans la mise au point de telles réalisations. La détermination de leurs caractéristiques électriques et thermiques relève plus souvent de l'approximation comparative que du calcul rigoureux à partir des données imposées par l'usager.

Ce sont ces réflexions qui ont amené à décider l'étude et la réalisation d'un petit four expérimental devant répondre à deux critères :

- Avoir une capacité relativement faible qui en ferait avant tout un instrument commode de laboratoire pour reproduire sur une échelle plus modeste les différents traitements thermiques et métallurgiques propres aux instruments de type industriel mis au point antérieurement,

- être conçu de façon à offrir un champ très large à l'expérimentation par le démontage simple et rapide et l'accessibilité complète de tous ses éléments.

Instrument de travail donc, mais aussi instrument d'étude, un tel prototype devant fournir des indications précieuses sur la répartition des températures dans l'enceinte, sur la part réservée à chacun des modes d'écoulement thermique et sur les valeurs qu'il convient d'attribuer aux coefficients de rayonnement des différents organes. Ces résultats devaient être susceptibles de généralisation pour le calcul ultérieur plus rigoureux de fours du même type mais de capacité plus grande.

Outre son intérêt purement expérimental et ceux que lui confère sa capacité réduite, le four présente les avantages propres aux fours sous vide élevé : les risques d'oxydation de l'élément chauffant et de la charge sont annulés et les réactions en phase gazeuse sont pratiquement supprimées. L'expérience a montré d'autre part que dans de nombreux cas, celui des carbures métalliques par exemple, le frittage obtenu présentait plus de régularité qu'en atmosphère réductrice.

Enfin, comme nous le verrons plus loin, le four a été conçu sans aucune matière réfractaire, ce qui permet un dégazage rapide de l'installation et réduit considérablement le temps d'obtention du vide limite entre deux cuissons ou deux manipulations successives.

II

GENERALITES SUR LE FOUR

a) DESCRIPTION

Comme l'installation de type industriel déjà réalisée au Laboratoire, le four présente trois parties essentielles :

- le groupe à vide élevé
- le four proprement dit
- l'installation électrique d'alimentation.

Ces trois parties sont réunies (voir photos p.5) dans un meuble en tôle formant bureau. Une place est prévue pour le manipulateur assis devant la cloche du four, à portée de l'ensemble des commandes mécaniques et électriques. Le dessus du meuble laissé libre par la cloche offre une large surface de travail très appréciable dans un laboratoire ou une salle de travaux pratiques.

- Le groupe à vide élevé

Le vide préliminaire est assuré par une pompe volumétrique à deux étages débitant 10m^3/h. Un jeu de vannes by-pass (voir schéma P.9) permet de la mettre en série avec une pompe à diffusion de vapeur d'huile de silicone déplaçant 400 litres/secondes sous une pression de 10^{-4}mmHg. La liaison entre le four et la pompe à diffusion est réalisée par un robinet-baffle dont la bride supérieure affleure à la surface du meuble. La pompe à diffusion est en communication d'autre part avec un réservoir cylindrique d'une trentaine de litres qui assure une inertie de vide et permet, si les conditions particulières d'une manipulation l'imposent, d'interrompre pendant un court instant le fonctionnement de la pompe préliminaire.

Le contrôle du vide au niveau du robinet-baffle est assuré par un manomètre barométrique gradué de 0 à 100 mmHg pour le vide grossier et par une jauge de Pirani pour les pressions comprises entre 10^{-3} et 10^{-4} mmHg.

FIGURE 1

Vue d'ensemble du four et de son meuble. La cuve a été enlevée pour faire apparaître l'ensemble des écrans.

On remarque sur la partie gauche du meuble les vannes du by-pass et la commande du robinet - baffle.

Le four proprement dit

Il comprend deux parties bien distinctes :

- Une enceinte en acier, amovible
- l'ensemble des organes, solidaires de la bride supérieure du robinet baffle.

L'enceinte amovible est une cuve cylindrique à double paroi, fermée à sa partie supérieure, plus étroite, par un couvercle fixé par vis traitées à tête creuse (voir photo et schéma). E lle repose sur la bride du robinet-baffle sans qu'il soit besoin d'ajouter un serrage à son propre poids pour assurer l'étanchéité lors de la mise en route de la pompe préliminaire, et comporte un anneau de saturne qui en facilite la manipulation.

L'élément chauffant (voir schéma p. 15) est un panier cylindrique de 80 mm de diamètre en fil de molybdène de 15/10. Chaque brin élémentaire après avoir subi un pliage ondulé sur une matrice a été relié aux brins voisins suivant les équipotentielles. L'ensemble est limité en haut et en bas par deux couronnes en molybdène qui assurent à la fois la rigidité mécanique et la liaison avec les électrodes. Celles-ci sont de ux électrodes tubulaires en cuivre rouge refroidies par circulation d'eau.

La forme adoptée pour les ondulations des brins du résistor est le fruit des études et essais menés dans ce domaine au laboratoire depuis plusieurs années. Elle assure à la fois, comme nous le verrons plus loin, une bonne souplesse de déformation en cours de fonctionnement et une grande surface de rayonnement, condition essentielle de longévité. L'expérience quotidienne a montré en effet que les accidents survenus à des éléments chauffants de ce type étaient toujours imputables à l'apparition locale de points chauds provoqués par une surface de rayonnement insuffisante;

Comme nous l'avons déjà souligné, le four ne comporte aucun matériau réfractaire. L'isolement thermique est assuré par une série de six écrans cylindriques coaxiaux, entièrement fermés les uns sur les autres, exception faite d'un orifice supérieur de contrôle de 30mm. Les deux écrans proches de l'élément sont en molybdène, les autres en acier inoxydable. L'ensemble a été conçu essentiellement avec le souci d'un démontage rapide. Aussi comporte-t-il trois parties (voir schéma et dessin page 13 et 17) :

- Une pyramide inférieure solidaire de la bride du baffle et composée de six plaques circulaires étagées, chaque plaque étant d'un diamètre légèrement supérieur à celui de l'écran correspondant qui vient y prendre appui.

FIGURE 2

Schéma de l'installation de vide.

Voir légende en bas de page 9.

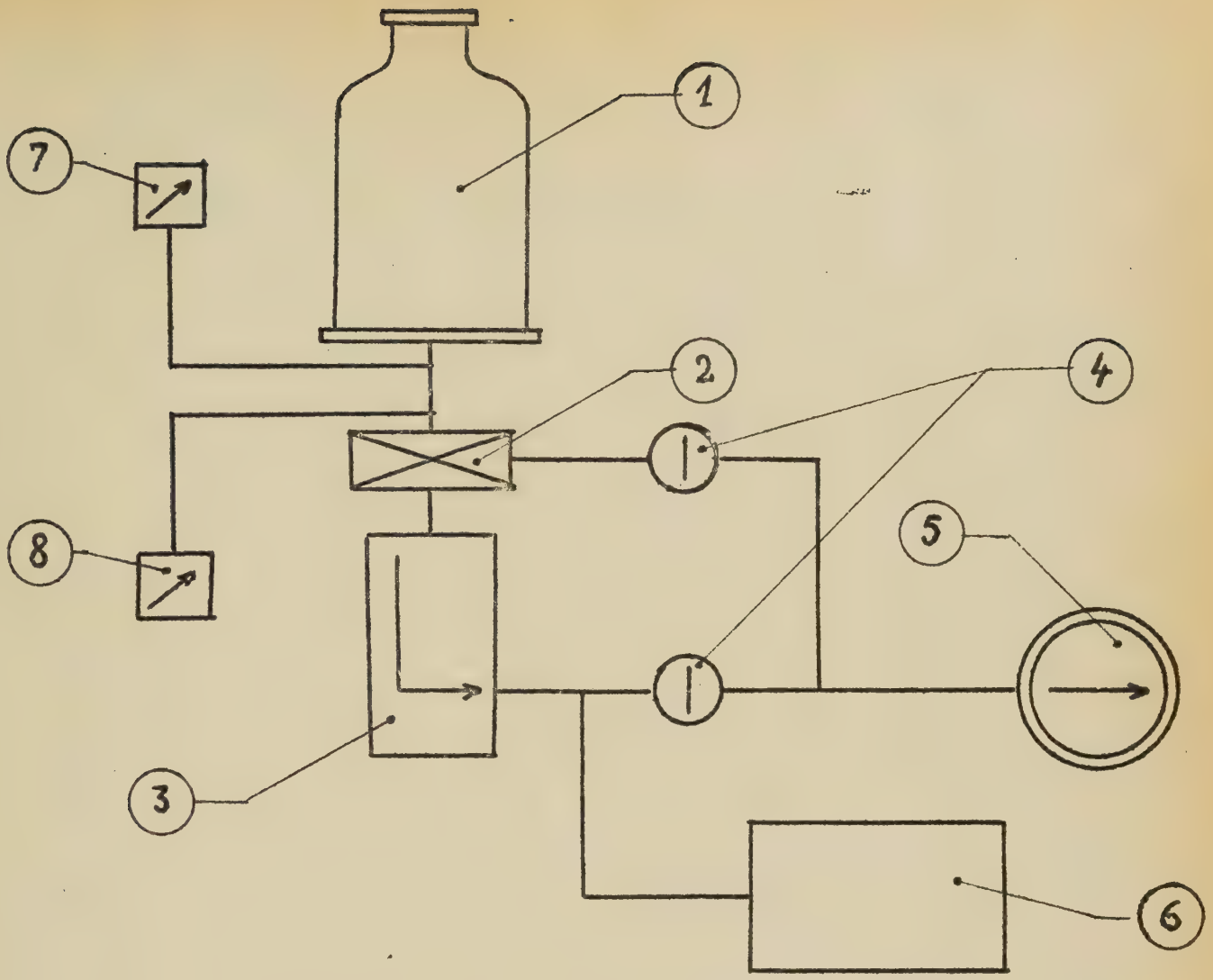


Schéma de l'installation de Vide

(Normalisation CGR)

1	Enceinte du four
2	Robinet - baffle
3	Pompe à diffusion
4	Vannes du by-pass
5	Pompe préliminaire
6	Réserve de vide
7	Manomètre
8	Jauge à ionisation

- les écrans proprement dits, cylindres ouverts suivant une génératrice pour permettre lors du montage le passage des amenées de courant de l'élément chauffant

- une double série de couvercles constituant un ensemble symétrique de la pyramide inférieure et comprenant :

. un assemblage de six couronnes planes de Ø 110 mm. d'alésage, chaque couronne venant coiffer l'un des écrans.
. Un assemblage étagé de six plaques circulaires qui viennent s'emboîter dans l'alésage des couronnes et sont elles-mêmes alésées à Ø 30 mm. pour permettre la surveillance des opérations et le contrôle des températures. Cette série de plaques peut être extraite par l'orifice supérieure de la cloche, libérant ainsi l'accès au coeur de l'enceinte. Cet artifice permet de retirer ou de mettre en place le charge, généralement composée de trois creusets cylindriques en graphite, sans qu'il soit besoin de soulever la cloche du four.

Le positionnement des écrans les uns par rapports aux autres, et la rigidité de l'ensemble sont assurés par une série d'espaceurs métalliques fixés par rivets.

Dans ces conditions quelques minutes seulement sont nécessaires pour démonter les six écrans et leurs couvercles et faire apparaître l'élément chauffant.

Le couvercle de la cloche comporte en son centre un hublot de visée protégé intérieurement par un volet en acier inoxydable dont la commande est assurée par une manoeuvre étanche.

Le refroidissement de l'ensemble est réalisé simultanément:

- par circulation d'eau dans la double paroi de la cloche
- par circulation d'eau dans les électrodes tubulaires et dans un serpentin soudé à une couronne plane chromée interposée entre la pyramide inférieure et la bride du robinet - baffle.

L'étanchéité de l'installation est assurée par joints toriques, sauf celle du support de la manoeuvre de protection du hublot, pour lequel nous avons utilisé un joint métallique spécial mis au point au laboratoire.

Suite page 18...

FIGURE 3

Coupe schématique du four. L'ensemble des écrans a été figuré sans le détail des espaceurs.

L'élément chauffant et les électrodes tubulaires sont représentés en élévation.

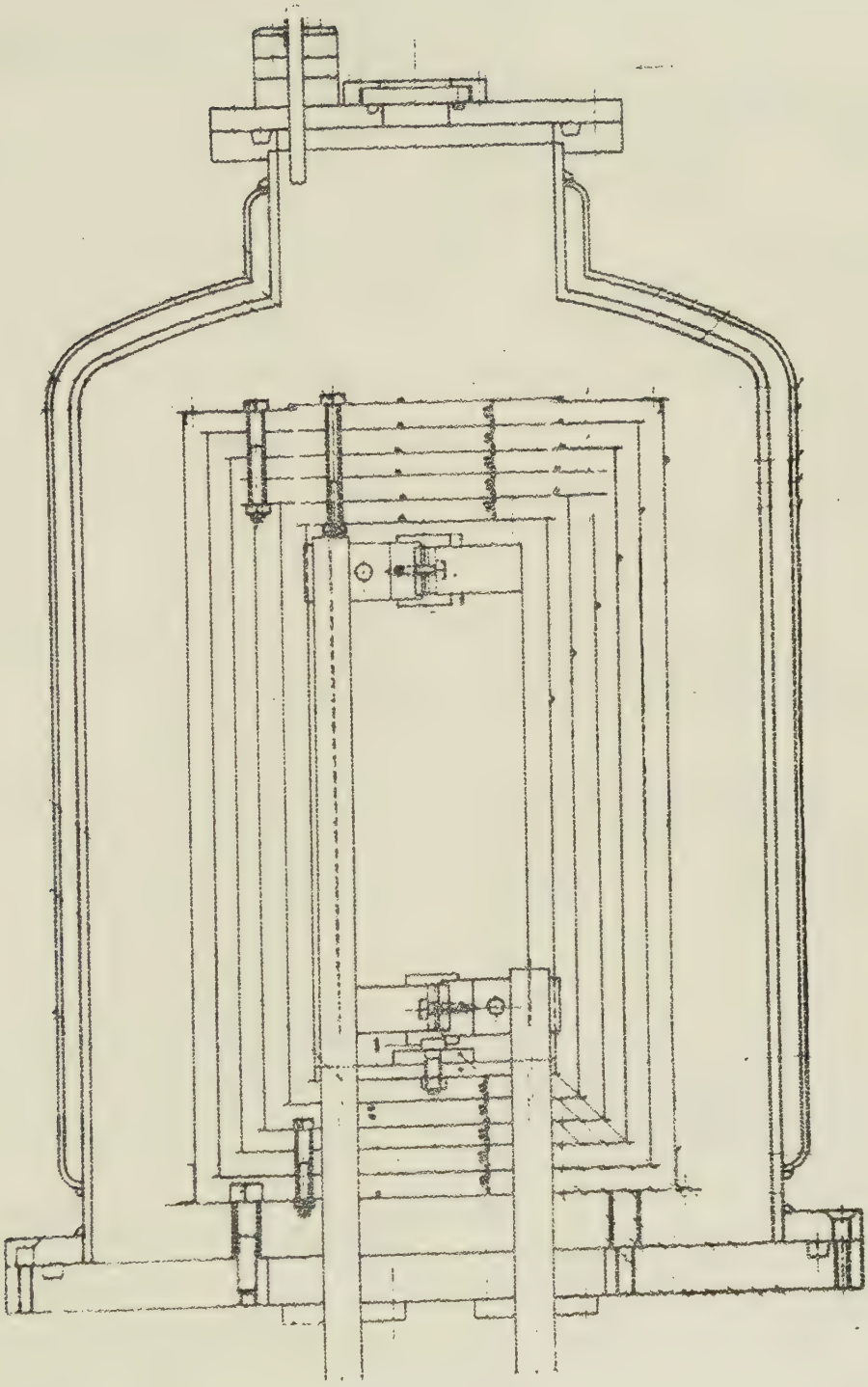


FIGURE 4

Schéma de l'élément chauffant.

Deux brins seulement du résistor ont été figurés entre les couronnes équipotentielles en molybdène.

On remarque, sur l'une des plaques supérieures de fixation, les gorges à section rectangulaire destinées à recevoir les brins.

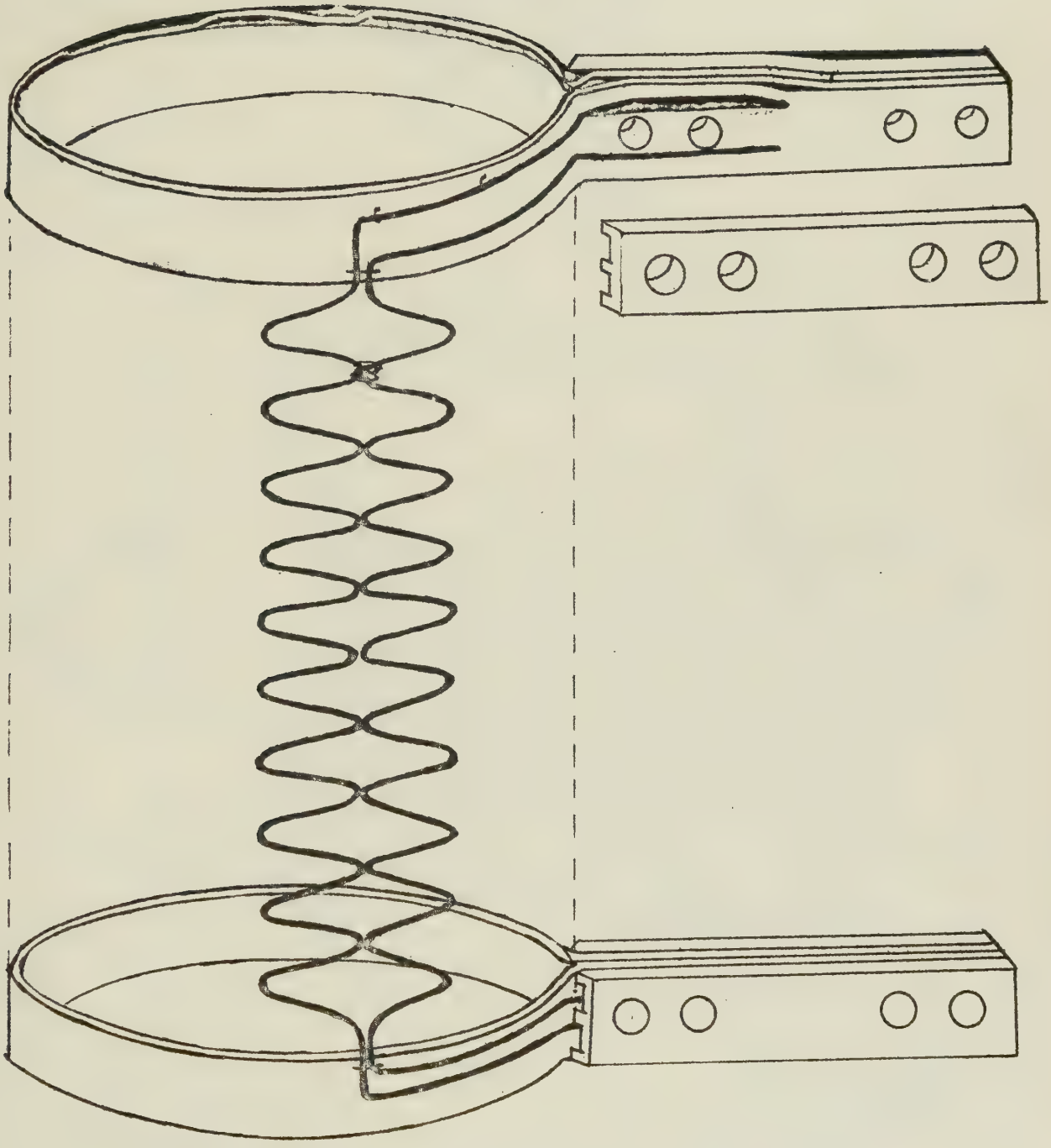
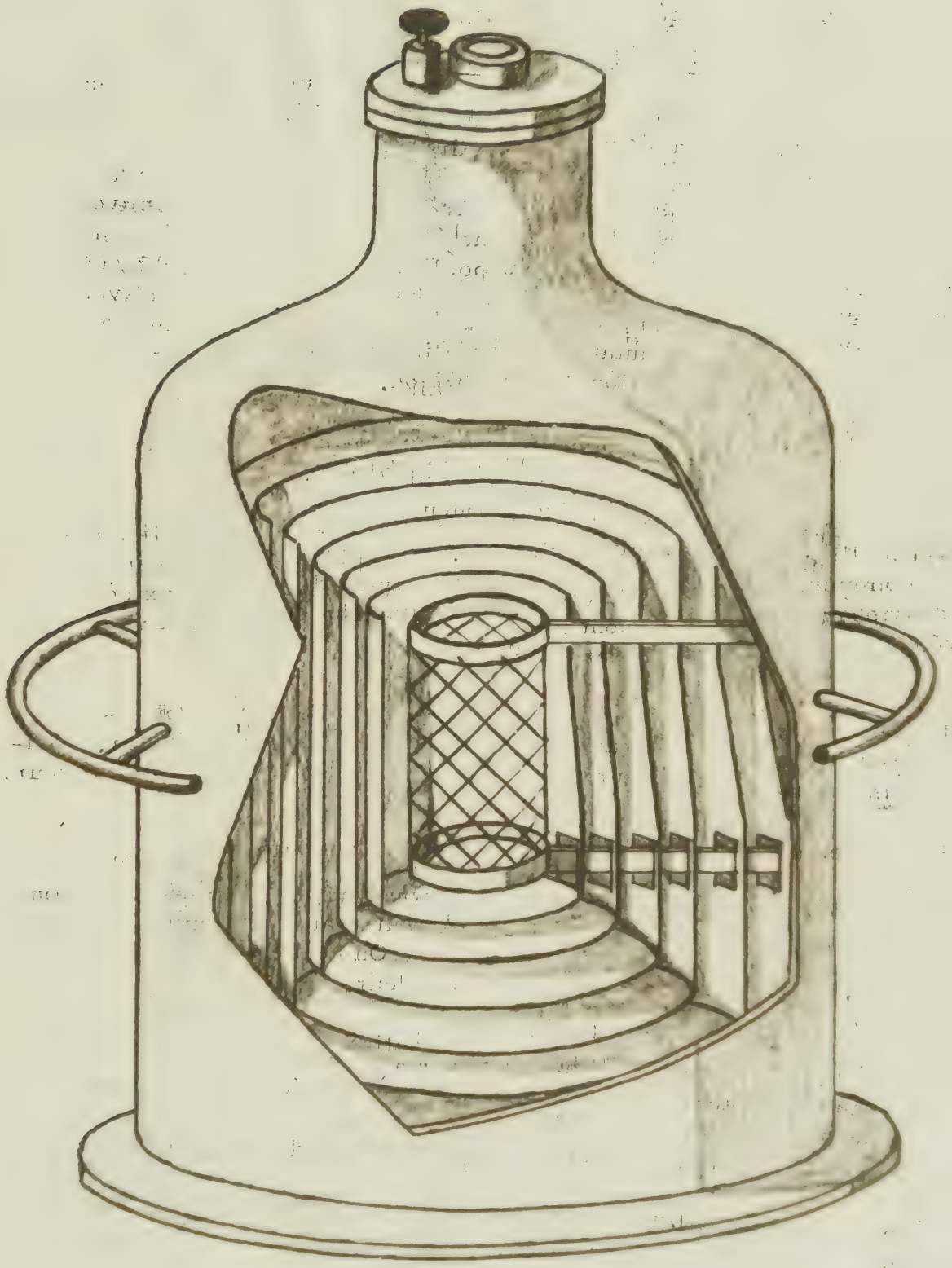


FIGURE 5

Dessin éclaté du four.

La double paroi de la cuve n'a pas été figurée.

L'ensemble supérieur des couronnes et des plaques est supposé enlevé. Les creusets en graphite ne sont pas représentés.



- L'installation électrique d'alimentation

La puissance est fournie à l'élément chauffant par un transformateur monophasé de 10 kVA alimenté sous 220V.

La régulation, qui s'effectue par prises multiples sur le primaire, offre au secondaire une gamme de tensions de volt en volt entre 5 et 15 volts. La mise au point de la température désirée est obtenue par un réglage fin qui permet d'étaler sensiblement de 2/10 en 2/10 de volt l'intervalle compris entre deux tensions successives quelconques du commutateur principal. L'expérience quotidienne a montré que cette solution simple était suffisante pour stabiliser la température de la charge à 5° C près environ.

L'une des électrodes en cuivre est à la masse ; la seconde est pourvue d'un passage isolé conçu au laboratoire.

Le contrôle du fonctionnement se fait par lecture de la tension et de l'intensité du circuit primaire. Les appareils de mesure et les commutateurs sont réunis sur la face avant du meuble aux côtés des appareils de contrôle et de mise en marche du groupe à vide élevé.

Seules les vannes du by-pass et la manoeuvre du robinet-baffle sont groupées sur le côté du meuble, à gauche de l'opérateur.

b) Calculs préliminaires

Comme nous l'avons déjà souligné, ce four est avant tout un prototype expérimental destiné à mettre au point un programme de calculs pour des projets ultérieurs. On ne s'est donc attaché dans sa conception qu'à des ordres de grandeur.

Par référence avec l'installation de type industriel déjà mise au point, la puissance à fournir a été évaluée à une dizaine de kw pour obtenir 1500° C sur la charge et se ménager la possibilité éventuelle d'atteindre des températures supérieures (jusqu'à 1700° C) moyennant une modification appropriée des écrans.

Les calculs proprement dits concernent deux chapitres :

- l'élément chauffant
- le groupe à vide.

L'élément chauffant

L'élément chauffant mis au point au laboratoire après les études déjà évoquées portant sur les conditions optima de déformation et de rayonnement, présentait les caractéristiques suivantes :

diamètre $\emptyset$ 110 mm
hauteur entre couronnes h = 200 mm
diamètre di fil d = 20/10
nombre de brins en parallèle N = 16
puissance maxima 15 kVA

Le projet prévoyait en fros une puissance moitié pour une tension au secondaire égale. Comme

$P = V^2/R$ le nouvel élément devait avoir environ une résistance double de celle du précédent. L'encombrement recherché, compte tenu des dimensions adoptées pour la cuve, était en ordre de grandeur :

$\emptyset = 80$ $\quad$ $h = 160$

D'où une modification de la longueur des brins dans le rapport:

$$k = 160/200 = 4/5$$

Soit r la résistance élémentaire d'un brin, l'élément de référence avait pour résistance :

$$R = r/16$$

Si x désigne le nombre de brins cherché pour le nouvel élément, on a donc la relation :

$$\frac{1}{x} \cdot \frac{4}{5} r = 2 \frac{r}{16}$$

d'où

$$x \neq 7$$

et la première solution théorique suivante :
N = 7 brins de d = 20/10 avec $\emptyset$ = 80 et h = 160
Mais N = 7 brins de $\emptyset$ = 80 ne sont pas compatibles.
Examinons le cas de N = 12 brins. Si r' désigne la résistance élémentaire d'un brin du nouvel élément, la résistance de ce dernier devient r'/12 au lieu de r'/7. Pour retrouver la valeur initiale il faut modifier le diamètre du fil dans le rapport :

$$\sqrt{\frac{7}{12}} = 0,765$$

ce qui donne :

$$d' = 15/10$$

C'est cette solution qui a finalement été retenue.
L'encombrement qui lui correspond est :

$$\underline{\varnothing = 82,5} \qquad \text{et} \qquad \underline{h = 167}$$

- Le groupe à vide élevé

La pression désirée dans l'enceinte du four devant être inférieure ou égale à 10^{-5}, le groupe de pompage à prévoir devra comporter une pompe préliminaire rotative assurant un vide primaire de l'ordre de 10^{-3} et une pompe à diffusion de vapeur d'huile de silicone. La détermination exacte des caractéristiques de ces deux appareils dépend, pour une grande part, de la valeur des fuites propres à l'installation. Or ces fuites sont de deux types : les fuites réelles inhérentes au montage qu'il est toujours possible de déceler et de réduire au maximum en cours de mise au point, et les fuites "virtuelles" dues au dégazage des parois et des différents matériaux inclus dans l'enceinte. Dans le cas particulier des fours à vide s'y ajoutent les dégazages variables des échantillons soumis à traitement thermique. Ces fuites virtuelles, si elles peuvent être réduites en partie par l'élimination systématique de certains matériaux tels que les réfractaires, sont malheureusement inconnues a priori.

Aussi est-on contraint de ne prévoir qu'un ordre de grandeur par excès de la puissance à donner aux éléments du groupe de pompage.

La pompe préliminaire dont nous disposions était une pompe à palettes à deux étages d'un débit maximum de 3 litres/seconde à la pression atmosphérique. Cette vitesse est une vitesse théorique. Il convient de la modifier en tenant compte des dimensions des canalisations. Celles-ci après épure, et pour satisfaire à des impératifs de mise en place et d'approvisionnement (pour les vannes en particulier), ont été fixées à 2 mètres environ de longueur et à 20 mm de diamètre.

En règime moléculaire la vitesse réelle S' est donnée par la formule :

$$\frac{1}{S'} = \frac{1}{S} + w\sqrt{\rho}$$

dans laquelle S désigne la vitesse théorique, ρ la densité du fluide

à la pression de I barye et où w a pour valeur :

$$w = \frac{6}{\sqrt{2\eta}} \frac{1 + 4/3\ d}{d^3}$$

l' et 1 + 4/3 d est par définition la "longueur équivalente" de la canalisation. Dans notre projet nous avions donc :

$$l' \quad 200 \quad \text{et} \quad d = 2$$

L'ouvrage de REIMANN sur la technique du vide donne pour l'air à 20°C les valeurs du produit $w\sqrt{\rho}$, par unité de longueur équivalente en mètre en fonction du diamètre.
Pour $\emptyset$ = 20 mm on a $w\sqrt{\rho} = 1,03\ 10^{-5}$

En prenant $S = 3.10^{+3}$ l/sec, on a donc :

$$\frac{1}{S'} = \frac{1}{3}\ 10^{-3} + 2.1,03.10^{-5}$$

d'où on tire

$$\underline{S' = 420\ cm^3/sec}$$

Il convient de vérifier si cette vitesse réelle, réduite par conséquent dans des proportions importantes, assure un temps de pompage acceptable de l'installation. Si l'on suppose que le débit de la pompe est constant le temps de pompage est donné par la formule :

$$t = \frac{2,3\ V}{S'} \log \frac{p_1}{p_2}$$

dans laquelle V désigne le volume en litres de l'enceinte et des canalisations. Si l'on prend :

$p_1 = 760$ mmHg
$p_2 = 10^{-2}$ mmHg

l'expression devient : (avec V = 40 litres)

$$t = \frac{2,3.40}{4\ 10^{-1}} \log \frac{7,6\ 10^2}{10^{-2}}$$

d'où

$$\underline{t \# 20 \text{ minutes}}$$

La détermination rigoureuse du débit d'une pompe à diffusion est rendue pratiquement impossible par l'imprécision qui règne sur l'importance à attribuer aux fuites virtuelles. Les ouvrages de technique du vide, en particulier le traité publié par la Société Française des Ingénieurs et Techniciens du Vide, conseillent la règle empirique suivante. Si S désigne le débit en l/sec à $p = 10^{-4}$ mmHg, il convient de satisfaire l'inégalité :

$$3\ V < S < 8V$$

dans laquelle V désigne le volume en litres de l'enceinte et des canalisations.

Le débit minimum de 3V correspond à des installations qui présentent des dégazages limités.

Le débit maximum de 8V correspond à des installations de métallurgie ou d'évaporation sous vide.

En prenant S = 8V, on obtient :

$$S = 8.40 = \underline{320 \text{ litres/sec.}}$$

La pompe choisie est une pompe à diffusion d'huile de silicone à deux étages sans fractionnement, de 400 litres/sec. sous $p = 10^{-4}$ mmHg.

III

ETABLISSEMENTS DES EQUATIONS

a) RAPPEL DES LOIS DE RAYONNEMENT

La transmission de l'énergie par rayonnement est régie par la loi de STEPHAN qui a pour expression :

$$dq = AT^4 \, d\omega \, ds \cos\alpha \qquad (1)$$

chaleur rayonnée pendant l'unité de temps dans l'angle solide $d\omega$ par un élément de surface ds d'un corps noir (donc parfaitement absorbant), à la température absolue T, dans une direction faisant un angle α avec la normale à ds.

Par intégration on obtient la chaleur rayonnée par unité de temps dans toutes les directions :

$$q = AT^4 \, ds \qquad (2)$$

il est d'usage dans les ouvrages techniques des industries de la chaleur de poser :

$$q = r \left(\frac{T}{100}\right)^4 ds \qquad (3)$$

avec par conséquent :

$$\eta A = r \, 10^{-8}$$

Les unités employées sont la kilocalorie, le mètre carré, le degré centigrade et l'heure ; ce qui donne pour r, "coefficient de rayonnement" du corps noir, la valeur :

$$r_o = 4,\ 93$$

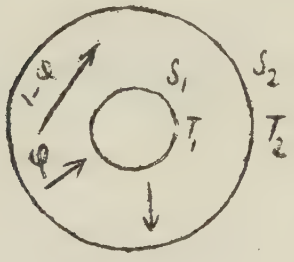
Dans la pratique le corps noir parfait n'existe pas et le pouvoir absorbant est toujours inférieur à l'unité. L'énergie émise est égale à celle qu'émettrait un corps noir multipliée par le pouvoir absorbant global a, c'est-à-dire étendu à toutes les longueurs d'onde, du corps considéré.

La loi précédente n'est alors souvent qu'approchée (pour un corps non noir bien entendu) car la proportionnalité à la quatrième puissance de la température n'est pas toujours vérifiée, mais la variation de l'exposant avec le corps est suffisamment faible pour qu'on puisse conserver l'expression (3) en modifiant en conséquence la valeur de a. On a donc en définitive avec les unités indiquées plus haut pour la chaleur rayonnée pendant le temps t :

avec $r = a.r_o$ $\qquad Q = rS\,(T/100)^4 r$

b) CAS DE DEUX CYLINDRES COAXIAUX ET FERMES L'UN SUR L'AUTRE.

Ce problème est abordé par Monsieur MONDIEZ dans son ouvrage de Physique Industrielle. Nous en donnons ci-dessous une démonstration légèrement différente.



Soit S_1 la surface du cylindre extérieur et S_2 celle du cylindre intérieur.

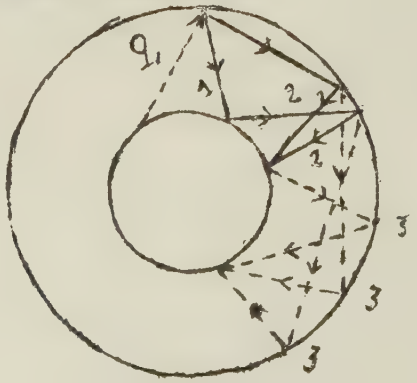
Calculons tout d'abord la part que S_1 absorbe sur son propre rayonnement.

Soit a_1 et a_2 les pouvoirs absorbants globaux respectifs des deux cylindres.

Pendant le temps r, S_1 rayonne :

$$q_1 = r_1 S_1 \left(\frac{T_1}{100}\right)^4 r$$

Cette quantité de chaleur va subir sur les deux surfaces une série d'absorbtions et de réémissions dont les premiers termes sont schématisés par la figure ci-dessous :



Mettons ce phénomène en équation :

S émet Q
I I

S_2 { absorbe : Q_1 a_2
renvoie : (1 -) Q_1

sur cette énergie renvoyée :

α = φ(1 -) Q_1 arrive sur S_1

β = (1 - φ) (1 -) Q_1 arrive sur S_2

d'où une première quantité :

$A_1 = \varphi(1 - \quad) Q_1$

reçue par S_1.

De α, S_1 renvoie : $\varphi(1 - a_1)(1 - a_2) Q_1$

dont S_2 { renvoie à S_1 : $\varphi^2 (1 - a_2)^2 \cdot (1 - a_1) Q_1$
renvoie à S_2 : $\alpha'' = (1 - \varphi)\varphi(1 - a_2)^2 (1 - a_1) Q_1$

De β, S_2 : { absorbe : $a_2 (1 - \varphi)(1 - a_2) Q_1$
renvoie : $(1 - \varphi)(1 - a_2)^2 Q_1$

Sur cette dernière énergie renvoyée :

$\alpha' = \varphi(1 - \varphi)(1 - a_2)^2 Q_1$ arrive sur S_1

$\beta' = (1 - \varphi)^2 (1 - a_2)^2 Q_1$ arrive sur S_2

d'où une seconde quantité reçue par S_1 :

$A_2 = \varphi^2 (1 - a_2)^2 (1 - a_1) Q_1 + \varphi(1 - \varphi)(1 - a_2)^2 Q_1$

$A_2 = \varphi(1 - a_2)^2 (1 - a_1\varphi) Q_1$

De A_2, S_1 renvoie : $\varphi(1 - a_2)^2 (1 - a_1)(1 - a_1\varphi) Q_1$

dont S_2 { renvoie à S_1 : $\varphi^2 (1 - a_2)^3 (1 - a_1)(1 - a_1\varphi) Q_1$
renvoie à S_2 : $\varphi(1 - \varphi)(1 - a_2)^3 (1 - a_1)(1 - a_1\varphi) Q_1$

De β', S_2 :

$$\begin{cases} \text{absorbe} : a_2 (1 - \varphi)^2 (1 - a_2)^2 \Omega_1 \\ \text{renvoie} : (1 - \varphi)^2 (1 - a_2)^3 \Omega_1 \end{cases}$$

Sur cette énergie renvoyée :

$\alpha''' = \varphi(1 - \varphi)^2 (1 - a_2)^3 \Omega_1$ arrive sur S_1

$\beta''' = (1 - \varphi)^3 (1 - a_2)^3 \Omega_1$ arrive sur S_2

De α'', S_2 :

$$\begin{cases} \text{absorbe} : a_2 (1 - \varphi) \varphi (1 - a_2)^2 (1 - a_1) \Omega_1 \\ \text{renvoie à } S_1 : \varphi^2 (1 - \varphi) (1 - a_2)^3 (1 - a_1) \Omega_1 \end{cases}$$

d'où une troisième quantité reçue par S_1 :

$$A_3 = \varphi^2 (1 - a_2)^3 (1 - a_1) (1 - a_1\varphi) \Omega_1 + \varphi(1 - \varphi)^2 (1 - a_2)^3 \Omega_1$$
$$+ \varphi^2 (1 - \varphi) (1 - a_2)^3 (1 - a_1) \Omega_1$$

$$A_3 = \varphi(1 - a_2)^3 (1 - a_1\varphi)^2 \Omega_1$$

En définitive S_1 reçoit de son propre rayonnement :

$$\Omega'_1 = \Omega_1 \left[\varphi(1 - a_2) + \varphi(1 - a_2)^2 (1 - a_1\varphi) + \varphi(1 - a_2)^3 (1 - a_1\varphi)^2 + \ldots . \right]$$

$$\Omega'_1 = \Omega_1 \varphi(1 - a_2) \left[1 + (1 - a_2) (1 - a_1\varphi) + (1 - a_2)^2 (1 - a_1\varphi)^2 + \ldots \ldots \right]$$

Il apparaît une progression géométrique de raison :

$$\lambda = (1 - a_2) (1 - a_1\varphi) < 1$$

ce qui donne pour Ω'_1 la limite :

$$\Omega'_1 = \frac{\varphi(1 - a_2) \Omega_1}{1 - (1 - a_1\varphi) (1 - a_2)} = \frac{\varphi(1 - a_2) \Omega_1}{a_2 + a_1\varphi(1 - a_2)} \qquad (1)$$

Sur cette quantité S_1 absorbe =

$$\Omega''_1 = \frac{\varphi a_1 (1 - a_2) \Omega_1}{a_2 + a_1\varphi(1 - a_2)} \qquad (2)$$

Appliquons le même raisonnement à la chaleur rayonnée par la surface S_2. Pendant le temps t, S_2 rayonne :

$$Q_2 = r_2 S_2 \left(\frac{T_2}{100}\right)^4 t$$

S_1 { absorbe $\varphi a_1 Q_2$ et laisse aller sur S_2 : $(1 - \varphi) Q_2$

renvoie sur S_2 : $(1 - a_1)\varphi Q_2$

donc S_2 reçoit au total : $-(1 - \varphi) Q_2 + (1 - a_1)\varphi Q_2 = (1 - a_1\varphi) Q_2$

dont elle rayonne : $(1 - a_1\varphi)(1 - a_2) Q_2$

donc à nouveau :

S_1 { absorbe : $\varphi a_1 (1 - a_1\varphi)(1 - a_2) Q_2$ et laisse aller sur S_2 : $(1 - \varphi)(1 - a_1\varphi)(1 - a_2) Q_2$

renvoie sur S_2 : $(1 - a_1)\varphi(1 - a_1\varphi)(1 - a_2) Q_2$

donc S_2 reçoit au total :
$(1 - \varphi)(1 - a_1\varphi)(1 - a_2) Q_2 + (1 - a_1)\varphi(1 - a_1\varphi)(1 - a_2) Q_2 = (1 - a_2)(1 - a_1\varphi)^2 Q_2$

Et ainsi de suite.
Donc S_2 reçoit de son propre rayonnement la fraction :

$$Q'_2 = Q_2 \left[(1 - a_1\varphi) + (1 - a_2)(1 - a_1\varphi)^2 + \ldots + (1 - a_2)^n (1 - a_1\varphi)^{n+1} + \ldots\right]$$

$$Q'_2 = (1 - a_1\varphi) Q_2 \left[1 + (1 - a_2)(1 - a_1\varphi) + \ldots + (1 - a_2)^n (1 - a_1\varphi)^n + \ldots\right]$$

On a de nouveau une progression géométrique de raison :

$$\eta = (1 - a_2)(1 - a_1\varphi) < 1$$

Ce qui donne pour Q'_2 la limite :

$$Q'_2 = \frac{(1 - a_1\varphi) Q_2}{a_2 + a_1\varphi(1 - a_2)} \qquad (3)$$

Sur cette quantité, S_2 absorbe :

$$Q''_2 = \frac{a_2 (1 - a_1\varphi) Q_2}{a_2 + a_1\varphi(1 - a_2)}$$

C'est donc que de son côté S_1 absorbe :

$$Q'''_1 = 1 - \frac{a_2 (1 - a_1\varphi)}{a_2 + a_1\varphi(1 - a_2)} \qquad Q_2 + = \frac{a_1\varphi Q_2}{a_2 + a_1\varphi(1 - a_2)}$$

Si l'on suppose $T_1 > T_2$, S_2 reçoit donc au total la quantité de chaleur :

$$Q = Q_1 - Q''_1 - Q'''_1$$

ce qui donne :

$$Q = Q_1 - \frac{\varphi(1 - a_2)\, a_1 Q_1}{a_2 + a_1\varphi(1 - a_2)} - \frac{a_1\varphi Q_2}{a_2 + a_1\varphi(1 - a_2)}$$

Soit, toutes réductions faites :

$$Q = \frac{a_2 Q_1 - \varphi a_1 Q_2}{a_2 + a_1\varphi(1 - a_2)} \qquad (4)$$

Si $T_1 = T_2 = T$, on a $Q = 0$

donc :

$$Q_2 Q_1 = Q_1 Q_2$$

$$Q_2 r_1 S_1 \left(\frac{T}{100}\right)^4 = Q_1 r_2 S_2 \left(\frac{T}{100}\right)^4$$

d'où l'on tire :

$$\varphi = \frac{Q_2 r_1 S_1}{Q_1 r_2 S_2} \qquad (5)$$

Mais d'après la définition du coefficient de rayonnement :

$$r_1 = a_1 r_0$$

$$r_2 = a_2 r_0$$

donc $r_1/r_2 = a_1/a_2$

ce qui donne : $\varphi = S_1/S_2 \qquad (6)$

En définitive l'expression (4) peut se mettre sous la forme :

$$Q = S_1 \frac{\left(\frac{T}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4}{\frac{1}{r_1} + \frac{S_1}{S_2}\left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_0}\right)} \cdot \tau \qquad (7)$$

ou encore :

$$Q = r\, S_1 \left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4 \right] \tau \qquad (8)$$

avec $\frac{1}{r} = \frac{1}{r_1} + \frac{S_1}{S_2}\left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_0}\right)$

c) CAS PARTICULIER DU FOUR

La mise en équation des phénomènes de rayonnement dans l'enceinte du four est simple lorsqu'il s'agit du rayonnement mutuel des écrans, mais se complique au centre par le rayonnement simultané du premier écran en molybdène, de l'élément chauffant et de la charge. On se trouve alors en gros dans le cas de deux écrans cylindriques fermés, l'un entourant complètement l'autre, mais séparés par un troisième écran cylindrique ajouré dont la température est maxima.

L'étude mathématique complète du rayonnement mutuel de ces trois corps conduirait à des résultats complexes qu'on ne saurait exploiter sur le plan technique.

Aussi avons-nous volontairement simplifié le problème en admettant un certain nombre d'approximations que la confrontation ultérieure des mesures expérimentales avec les résultats du calcul ont parfaitement justifiées.

Les approximations d'où nous sommes partis sont les suivantes :

- on suppose l'épaisseur de chaque écran négligeable devant le diamètre du cylindre pour pouvoir considérer comme égales les surfaces intérieure et extérieure et leurs températures respectives ;

- on assimule l'élément chauffant à un cylindre ajouré pour lequel les intervalles, c'est à dire les vides du panier en molybdène, représentent le 1/nième de la surface totale de base S_t ;

- On suppose la loi de STEPHAN applicable dans les conditions précisées plus haut ;

- On suppose enfin qu'un régime permanent est établi : le gradient de température entre la charge et la cuve est donc constant.

Prenons alors comme symboles respectifs des surfaces totales de rayonnement, des températures et des coefficients de rayonnement :

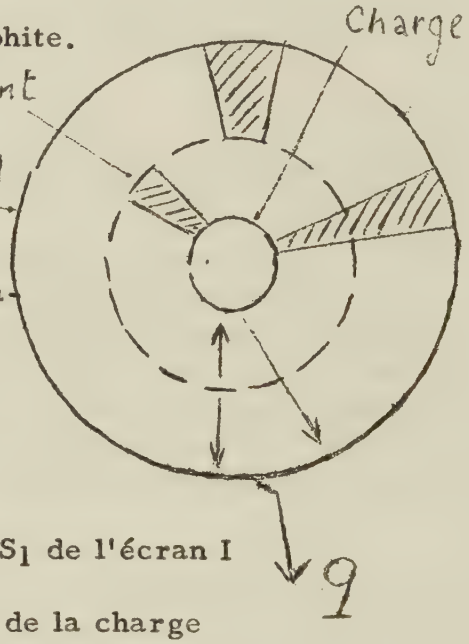
$2 S_1$ Θ_1 et r_1 pour le premier écran en molybdène

$2 S$ T et r pour l'élément chauffant

s t et r' pour les creusets en graphite.

On a par définition :

$$2 S = (1 - \frac{1}{n})\ 2 S_t$$



Lorsque le régime permanent est établi, on peut admettre de façon schématique (voir figure) que pendant l'unité de temps :

- $(1/n)$ s de la charge rayonne vers $(1/n)$ S_1 de l'écran I

- S de l'élément chauffant rayonne vers s de la charge

- Ces deux rayonnements s'égalisent pour maintenir constante la température t de la charge.

Ceci revient à considérer en première approximation une propagation purement radiale du rayonnement à travers les intervalles de la surface intermédiaire, entre deux surfaces homothétiques.

D'où les équations :

$$\rho' \frac{s}{n}\left[\left(\frac{t}{100}\right)^4 - \left(\frac{\Theta_1}{100}\right)^4 \right] = \rho\, S \left[\left(\frac{T}{100}\right)^4 - \left(\frac{t}{100}\right)^4 \right] \qquad (1)$$

$$\text{avec } 1/\rho' = \frac{1}{r'} + \frac{s/n}{S1/n} \cdot \left[\frac{1}{r1} - \frac{1}{r0} \right] \qquad (2)$$

$$1/\rho = \frac{1}{r} + \frac{S}{s} \left[\frac{1}{r'} - \frac{1}{r0} \right] \qquad (3)$$

On peut admettre d'autre part que :

- (1/n) s de la charge rayonne vers (1/n) S_1 de l'écran I

- S de l'élément rayonne vers S_1 de l'écran I

- La somme de ces deux rayonnements doit être égale à Q, chaleur transmise de proche en proche pendant l'unité de temps jusqu'au milieu ambiar (circuit de refroidissement et rayonnement direct).

Lorsque le régime permanent est établi cette quantité de chaleur évacuée à l'extérieur pendant l'unité de temps est égale à celle que rayonne l'élément chauffant pendant le même temps.
On a donc les équations :

$$\rho'' S \left[\left(\frac{T}{100}\right)^4 - \left(\frac{\theta_1}{100}\right)^4 \right] + \rho' \frac{s}{n} \left[\left(\frac{t}{100}\right)^4 - \left(\frac{\theta_1}{100}\right)^4 \right] = Q \qquad (4)$$

avec

$$1/\rho'' = \frac{1}{r} + \frac{s}{S'} \left(\frac{1}{r'} - \frac{1}{r0} \right) \qquad (5)$$

En fait, comme nous le verrons plus loin, la conductibilité entre aussi pour une part importante dans la transmission de la chaleur introduite dans l'enceinte du four. La valeur de Q doit donc être modifiée compte tenu des résultats de l'expérience :

$$\rho'' S \left[\left(\frac{T}{100}\right)^4 - \left(\frac{\theta_1}{100}\right)^4 \right] + \rho' \frac{A}{n} \left[\left(\frac{t}{100}\right)^4 - \left(\frac{\theta_1}{100}\right)^4 \right] = Q' \qquad (6)$$

Enfin le rayonnement mutuel des différents écrans nous ramène au cas étudié plus haut de deux cylindres fermés. La transmission par rayonnement d'écran à écran depuis l'écran (1) jusqu'à la cuve du four s'exprime par une équation générale du type :

$$Q_{n,n-1} = r''_{n,n-1} S_{n-1} \cdot \left[\left(\frac{\theta_{n-1}}{100}\right)^4 - \left(\frac{\theta_n}{100}\right)^4 \right] \qquad (7)$$

avec

$$\frac{1}{r''_{n,n-1}} = \frac{1}{r_{n-1}} + \frac{S_{n-1}}{S_n} \left[\frac{1}{r_n} - \frac{1}{r0} \right] \qquad (8)$$

n et (n-1) désignant les numéros respectifs des écrans.

L'utilisation pratique de ces équations se heurte à une double imprécision :

- Imprécision sur les différents coefficients de rayonnement dont on ne connaît pas les valeurs exactes en raison de l'altération des surfaces par condensation de vapeurs métalliques, oxydation etc...

- Imprécision sur la part qu'il y a lieu de réserver a rayonnement dans la transmission de l'énergie au sein du four.

C'est à lever ces deux anbiguités que nous nous sommes attachés dans la série d'essais décrits plus loin.

Les différents paramètres étant précisés, nous avons donc à notre disposition un système du type :

$$\begin{cases} f(t, \Theta 1, T) = 0 \\ g(t, \Theta 1, T, Q) = 0 \end{cases}$$

avec pour inconnues, dans l'établissement d'un projet de four du même type :

T, $\Theta 1$ et Q.

IV

COMPTE-RENDU DES ESSAIS REALISES

a) ESSAIS DE FONCTIONNEMENT

- Essai de vide

Les essais de vide d'une installation portent sur la détermination de deux caractéristiques : la valeur des fuites réelles et celle du vide limite.

La valeur des fuites réelles s'obtient en mesurant la remontée moyenne de pression dans l'enceinte pendant un temps donné. Il est courant, en particulier dans les ouvrages techniques allemands, d'exprimer les fuites en torr-litre/seconde (1 torr = 1 mmHg). On a alors la relation simple :

$$G = \frac{\Delta p.\ V}{t} \qquad (1)$$

où G désigne la fuite

Δ p la remontée de pression en torr

V le volume en litres (V = 40 l dans le cas de l'installation)

t le temps en secondes.

Il est ensuite aisé de passer, si on le désire, en cm^3/seconde à la pression atmosphérique. On a en effet :

1 torr-litre/seconde = 1000/760 = 1/0, 76 cm^3- atm/seconde

La remontée moyenne de pression dans l'installation était au cours des essais de :

$$p = 50\mu/h$$

ce qui donne :

$$G = \frac{50\ 10^{-3}\ 40}{3,\ 6\ 10^3}$$

d'où

$$G \# 6.10^{-4} \text{ torr-litre/seconde}$$

Connaissant la valeur de G il est possible en négligeant les fuites virtuelles de calculer le vide limite de l'installation. Celui-ci est en effet atteint lorsqu'un équilibre se crée entre la fuite et le débit de la pompe à diffusion. On a donc la relation :

$$p_{\infty} = p_1 + \frac{G}{S_{eff}} \qquad (2)$$

dans laquelle

S_{eff} désigne la vitesse effective de la pompe
p_1 la pression limite de la pompe
p_{∞} la pression limite de l'installation.

Dans la zone des 10^{-5} torr, S_{eff} est de l'ordre de 100 l/sec. Comme :

$$p_1 = 5.10^{-6}$$

on a :

$$p_{\infty} = 5.10^{-6} + \frac{6.10^{-4}}{10^2}$$

d'où

$$p_{\infty} = 1,1.10^{-5} \text{ torr}$$

Les essais de vide avec dégazage à chaud des parois de la cuve ont conduit à une pression limite de $3,7.10^{-5}$ torr mesurée à la jauge à ionisation N.R.C. La valeur trouvée plus haut par le calcul pourrait être atteinte à condition d'éliminer totalement les fuites virtuelles. On peut d'ailleurs se faire une idée de leur importance en appliquant la relation (2) aux deux pressions limites (théorique et expérimentale). On a alors :

$$G' = 10^2 (3,7.10^{-5} - 1,1.10^{-5})$$

d'où :

$$G' = 26.10^{-4} \text{ torr-litre/seconde}$$

On voit que :

$$G' \# 4G$$

C'est dire que les fuites virtuelles sont de beaucoup les plus importantes. Et leur effet est d'autant plus néfaste qu'elles résultent (voir page20) non pas d'une insuffisance de mise au point, toujours partiellement corrigible, mais de la nature même des matériaux qui composent l'enceinte et les accessoires. Il est à noter à ce propos que c'est en partie par souci de réduire les fuites virtuelles dues au dégazage qu'on préfère l'acier inoxydable à l'acier doux pour la fabrication des écrans et de la cuve. L'acier inoxydable, outre qu'il dégaze moins, possède aussi l'avantage d'une meilleure tenue à chaud et d'une absence de vibrations par magnétisme.

- Essais de chauffage

Les essais de chauffage ont pour but d'établir la courbe moyenne de montée en température en fonction de la puissance introduite dans le four. Ils comportent donc une mesure de puissance et une mesure de température.

La mesure de température se fait au pyromètre optique à disparition de filament en visant un orifice de Ø 10 mm pratiqué dans le couvercle des creusets en graphite placés dans l'axe de l'élément chauffant. Cette mesure est entâchée d'une erreur systématique due à l'absorbtion par le verre du hublot de la cuve d'une partie du flux d'énergie recueilli dans le pyromètre. Il convient donc avant d'établir une courbe de correction des valeurs données par l'appareil.

La mesure de puissance peut se faire par lecture directe de l'intensité et de la tension du circuit primaire. Mais, là encore des corrections sont indispensables puisqu'on ne connaît ni le cos Ø ni le rendement du transformateur. Il convient donc de faire une manipulation préliminaire en branchant dans le circuit secondaire un ampèremètre, un voltmètre et un wattmètre.

A) Correction de température

La courbe de correction de température a été établie en faisant des visées au pyromètre dans un four tubulaire de laboratoire. Ce four fonctionnant à l'air libre, il était possible de faire systématiquement deux lectures, avec et sans hublot. Les résultats sont donnés par la courbe de la figure 6 page 39 .

On voit que l'erreur due à l'absorbtion du hublot de visée crôit d'une façon sensiblement linéaire en fonction de la température. Elle est loin d'être négligeable puisqu'elle atteint une cinquantaine de degrés dans la zone de travail habituelle des fours de frittage (1450/1500°C).

B) Mesure exacte de puissance

On a utilisé le montage schématisé à la figure 7, page 37. Le transformateur d'intensité T1 entoure l'une des barres d'amenée de courant à l'élément chauffant. Les résultats sont donnés dans le tableau 1, page 37. Comme on peut le constater en comparant les chiffres des deux dernières colonnes, le facteur de puissance de l'installation est très voisin de 1. La puissance recueillie au secondaire témoigne d'autre part d'un bon rendement du transformateur.

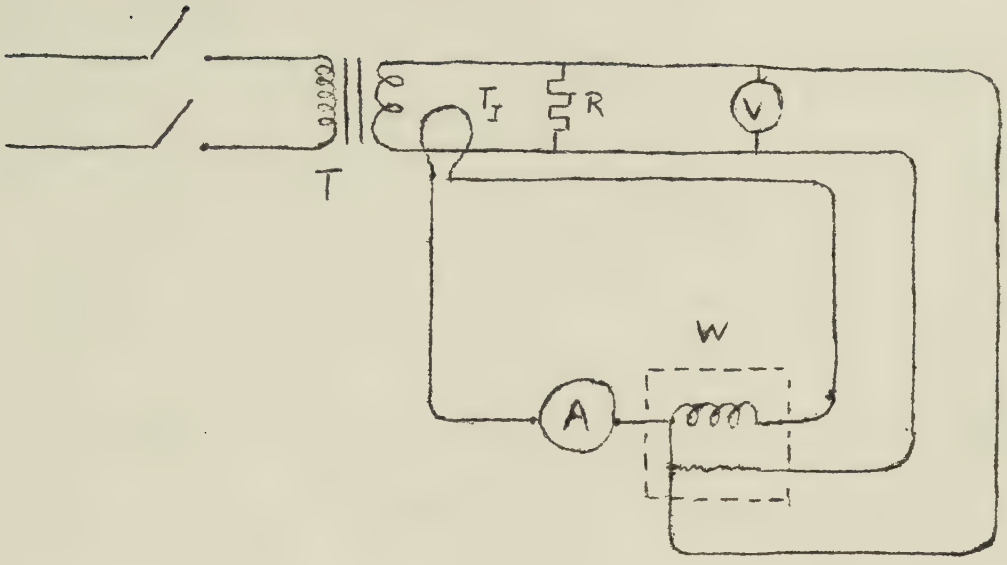
C) Essais de chauffage proprement dits

L'expérience quotidienne du laboratoire a montré que la température atteinte sur la charge était influencée d'une façon très sensible par les variations de tension du réseau. Ces essais ont donc porté sur un certain nombre de "cuissons", faites à des heures et dans des conditions différentes. Ils permettent d'établir une cuisson type par le calcul d'une valeur moyenne de la température intérieure de la charge. Cette dernière, qui est une caractéristique importante du four, se mesure avec une très bonne précision grâce aux conditions thermiques voisines de celles du corps noir offertes par les creusets en graphite utilisés. La série de cuissons d'essais a donné les résultats suivants, résumés dans le tableau 2, page 40 (la correction d'absorbtion du hublot a été faite directement sur la moyenne).

Il est également nécessaire pour les calculs ultérieurs de connaître la montée en température des fils de molybdène de l'élément chauffant. On se heurte là à une difficulté. Lorsqu'on utilise en effet un pyromètre monochromatique à disparition de filament pour viser une source quelconque, l'indication de l'appareil ne correspond pas à la température de cette source mais à la température θ_λ du corps noir de même brillance. C'est la "température de brillance" de la source considérée. Si T désigne sa température vraie et $b_{\lambda T}$ sa brillance pour la longueur d'onde λ de l'appareil on a la relation :

$$b_{\lambda T} = c_1 \lambda^{-5} \frac{1}{e^{\frac{c_2}{\lambda \theta_\lambda}} - 1}$$

dite "formule de PLANCK".



- figure 7 -

TABLEAU I

Plots	Primaire			Secondaire			
	I_1 A	V_1 V	I_1V_1 VA	I_2 A	V_2 V	I_2V_2 VA	W W
1	11	234	2570	450	5,40	2430	2460
2	15	231	3460	492	6,45	3170	3200
3	20	227	4540	543	7,50	4070	4140
4	24	230	5510	589	8,60	5050	5040
5	30	227	6800	639	9,70	6200	6200
6	35	226	7900	678	10,60	7190	7200
7	40	225	9000	713	11,55	8240	8300

FIGURE 6

Courbe donnant la correction de température due à l'absorbtion pour un hublot de plexiglass de 7 mm d'épaisseur.

Le Δt lu en ordonnées est à ajouter à la température donnée par le pyromètre à disparition de filament MECI.

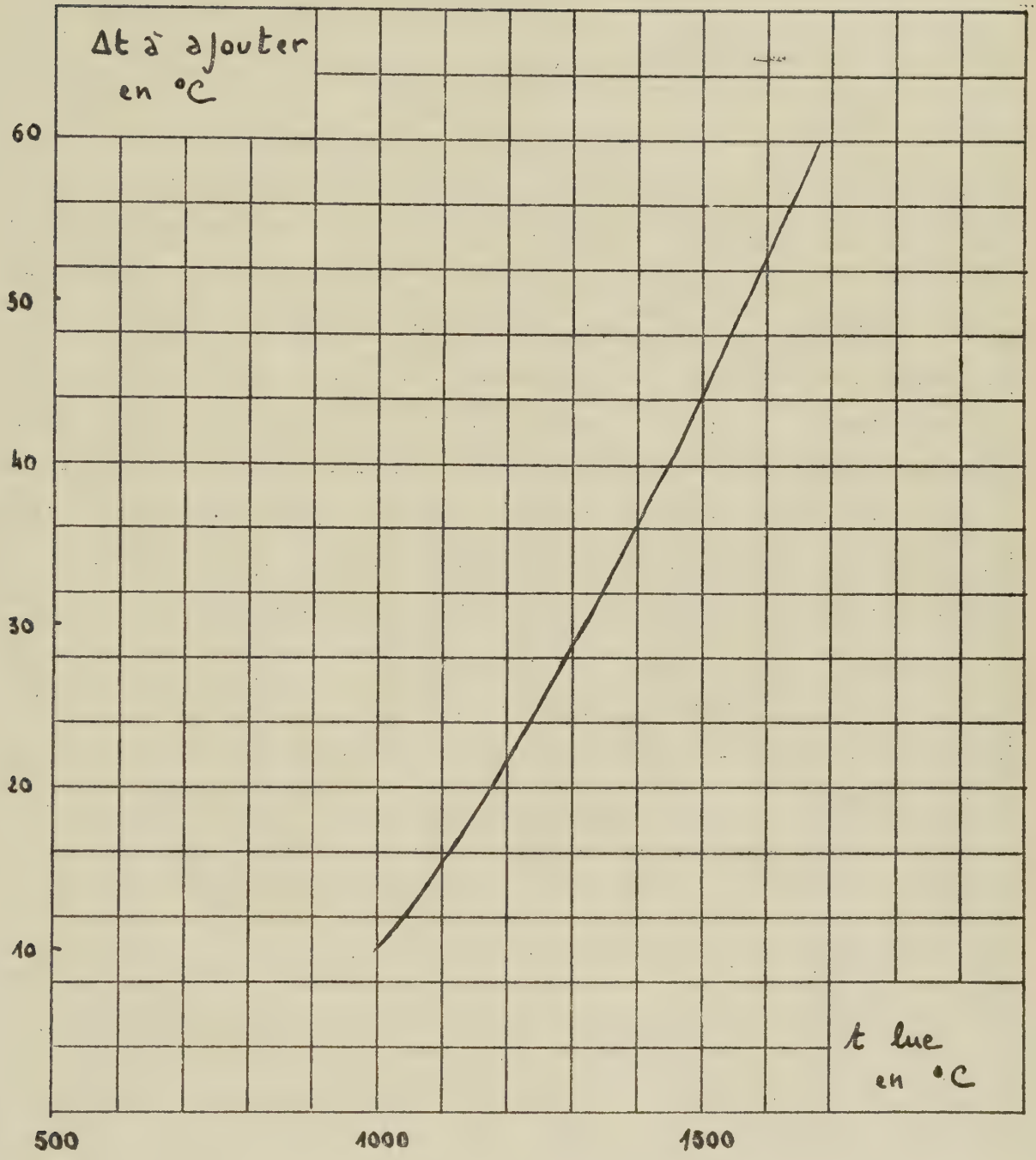

Δt à ajouter
en °C
60
50
40
30
20
10
500
1000
1500
t lue
en °C

TABLEAU 2

Plots	Températures de charge relevées ° C					Moyenne	Moyenne corrigée
1	1120	1130	1115	1110	1110	1115	1130
2	1230	1250		1225		1240	1270
3	1345	1350	1360	1365	1330	1350	1390
4	1420	1430	1415	1430	1410	1420	1455
5	1500	1520	1495	1520	1445	1495	1535
6	1550					1550	1595

On la réduit en général à l'expression plus simple :

$$b_{\lambda T} = c_1 \lambda^{-5} \; e^{-c_2/\lambda\theta_\lambda}$$

dite "formule de WIEN"

Si d'autre part $a_{\lambda T}$ désigne le pouvoir absorbant de la source, on a en vertu de la loi de KIRCHHOFF :

$$b_{\lambda T} = a_{\lambda T}.c_1.\lambda^{-5} \; e^{-c_2/\lambda T}$$

Ces deux relations conduisent à l'expression :

$$\text{colog. } a_{\lambda T} = \frac{C_2 \log e}{\lambda} \left(\frac{1}{\theta_\lambda} - \frac{1}{T}\right)$$

CONDON et ODISHAW dans "Handbook of Physics" donnent pour le pouvoir absorbant du molybdène les valeurs suivantes :

T °K	λ (Å)	a	λ (Å)	a
300	6650	0,420	4670	0,425
1300	"	0,378	"	0,395
2000	"	0,353	"	0,380

La longueur d'onde λ = 6650 Å correspond sensiblement au filtre du pyromètre utilisé. Les valeurs de $a_{\lambda T}$ correspondantes permettent de tracer la courbe de la figure 7 page 45. C'est, on le voit, sensiblement une droite.

Les températures de brillance relevées, correction de hublot faite, sont les suivantes :

θ_λ (°C) brillance	1390	1490	1590	1690	1710
t (°C) charge	1140	1310	1400	1470	1540

Calculons les températures vraies correspondantes :

On a :

$$\frac{1}{\Theta} - \frac{1}{T} = \frac{\lambda \operatorname{colog} a}{c_2 \log e}$$

avec $C_2 = 14320 \mu$ d°

ce qui donne :

Θ °K	1 660	1760	1860	1920	1980
a	0,365	0,362	0,358	0,356	0,354
colog.a	0,43771	0,44129	0,44612	0,44855	0,45100
λ colog a	0,2911	0,2935	0,2967	0,2983	0,2999
C_2 log.e	6219,18	"	"	"	"
$\Delta(\frac{1}{T})$	$4,69 \times 10^{-5}$	$4,72 \times 10^{-5}$	$4,77 \times 10^{-5}$	$4,79 \times 10^{-5}$	$4,82 \times 10^{-5}$
$\frac{1}{\Theta}$	$60,24 \times 10^{-5}$	$56,81 \times 10^{-5}$	$53,76 \times 10^{-5}$	$52,08 \times 10^{-5}$	$50,50 \times 10^{-5}$
$\frac{1}{T}$	$55,55 \times 10^{-5}$	$52,09 \times 10^{-5}$	$48,99 \times 10^{-5}$	$47,29 \times 10^{-5}$	$45,68 \times 10^{-5}$
T°K	1800	1920	2040	2120	2190
T°C	1530	1650	1770	1850	1920
Δ T	140	160	180	200	210

On voit que l'erreur commise est loin d'être négligeable et croît régulièrement avec la température. Ces résultats permettent de tracer la courbe de la page 45 donnant le Δ T pour une température absolue de brillance quelconque.

Ces différents résultats sont résumés par les courbes de la figure 9 page 47

La courbe de montée en température de la charge atteint assez rapidement un coefficient angulaire élevé, traduction graphique d'une difficulté technique bien connue : les derniers degrés sont les plus difficiles à obtenir, la puissance à fournir étant relativement de plus en plus importante. Les pertes croissent en effet avec le gradient de température. L'écart de température entre la charge et l'élément chauffant va lui aussi en augmentant au cours de la montée en température.

b) Etudes thermiques

Lorsque ces études ont été faites, le four fonctionnait déjà de façon régulière depuis plusieurs mois. Les résultats obtenus concernant donc un appareil "rodé", et cette remarque est importante car l'expérience a montré que le "vieillissement" des écrans, l'altération de leur surface réfléchissante par pollution en cours de cuisson, avait une influence notable sur les performances de l'appareil. Mais l'expérience montre aussi que cette influence se stabilise rapidement.

L'étude d'un four neuf, n'ayant pas encore atteint ce régime d'équilibre, aurait conduit à des résultats moins intéressants pour l'utilisateur.

- Etude du gradient de température

Il est absolument essentiel pour les projets ultérieurs et pour une étude thermique complète du four de connaître la répartition des températures sur les différents écrans en fonction de la puissance introduite.

Ces mesures ont été faites avec des couples thermo-électriques platine-platine rhodié et chromel-alumel, reliés à des passages isolés pratiqués pour la circonstance dans le couvercle de la cuve. L'expérience a montré que les difficultés étaient nombreuses, la principale étant celle de rendre la soudure du couple solidaire de l'écran étudié sans la court-circuiter.

Il était nécessaire d'autre part de faire une comparaison systématique des indications fournies par les couples thermo-électriques et par le pyromètre à disparition de filament. Ces mesures, effectuées

Suite page 48

FIGURE 7

Courbe donnant le pouvoir absorbant du molybdène en fonction de la température pour λ = 6650 Å,

établie d'après les valeurs indiquées par CONDON & ODISHAW.

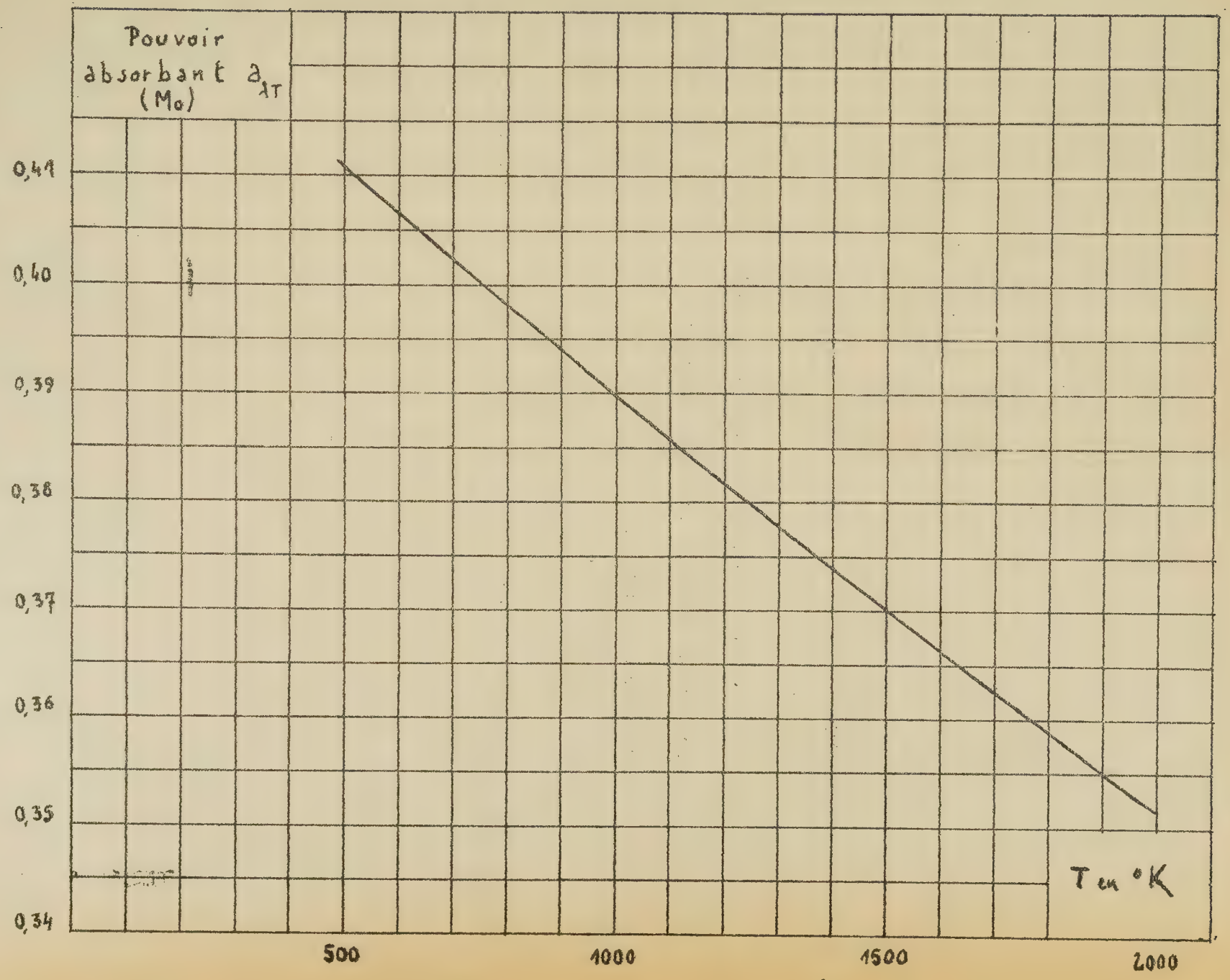

Pouvoir absorbant $a_{\lambda T}$ (Mo)
0,41
0,40
0,39
0,38
0,37
0,36
0,35
0,34
500
1000
1500
2000
T en °K

FIGURE 8

Courbe donnant la correction de brillance pour le molybdène, correspondant à une longueur d'onde de 6650 °A. (filtre rouge du pyromètre).

Le t lu en ordonnées est à ajouter à la température de brillance donné par le pyromètre optique pour obtenir la température vraie.

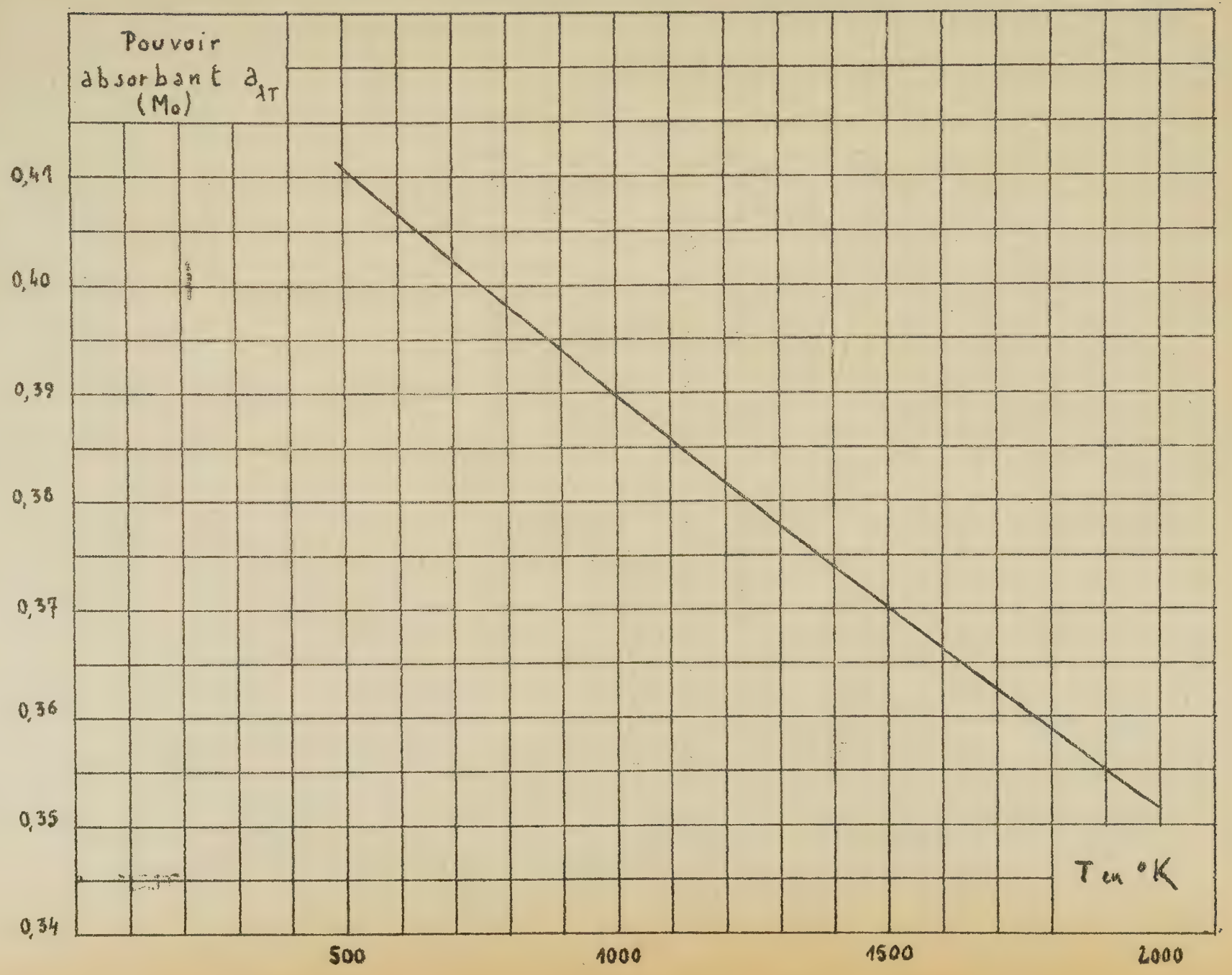

Pouvoir absorbant $a_{\lambda T}$ (Mo)
0,41
0,40
0,39
0,38
0,37
0,36
0,35
0,34
500
1000
1500
2000
T en °K

FIGURE 8

Courbe donnant la correction de brillance pour le molybdène, correspondant à une longueur d'onde de 6650 °A. (filtre rouge du pyromètre).

Le t lu en ordonnées est à ajouter à la température de brillance donné par le pyromètre optique pour obtenir la température vraie.

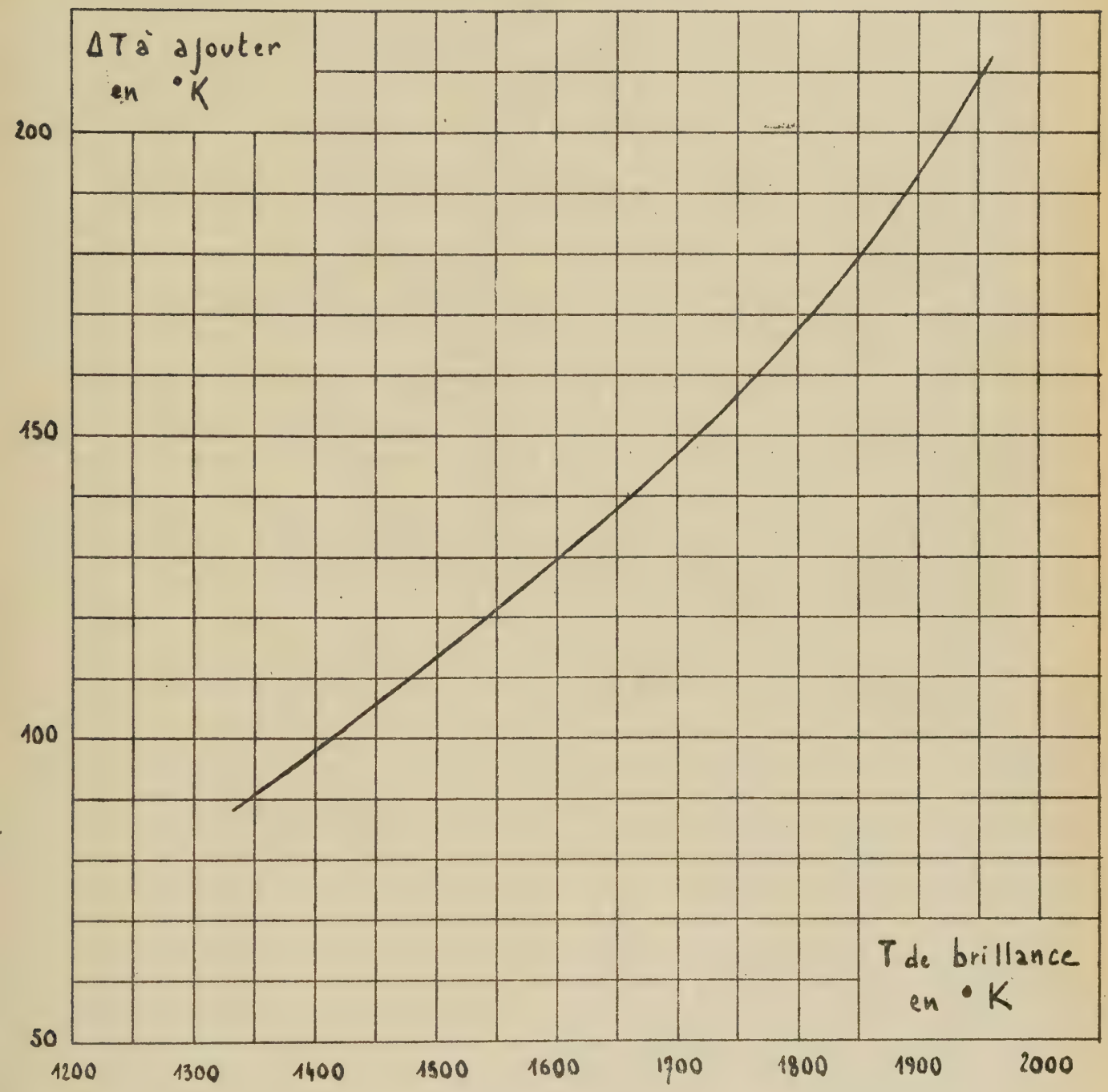
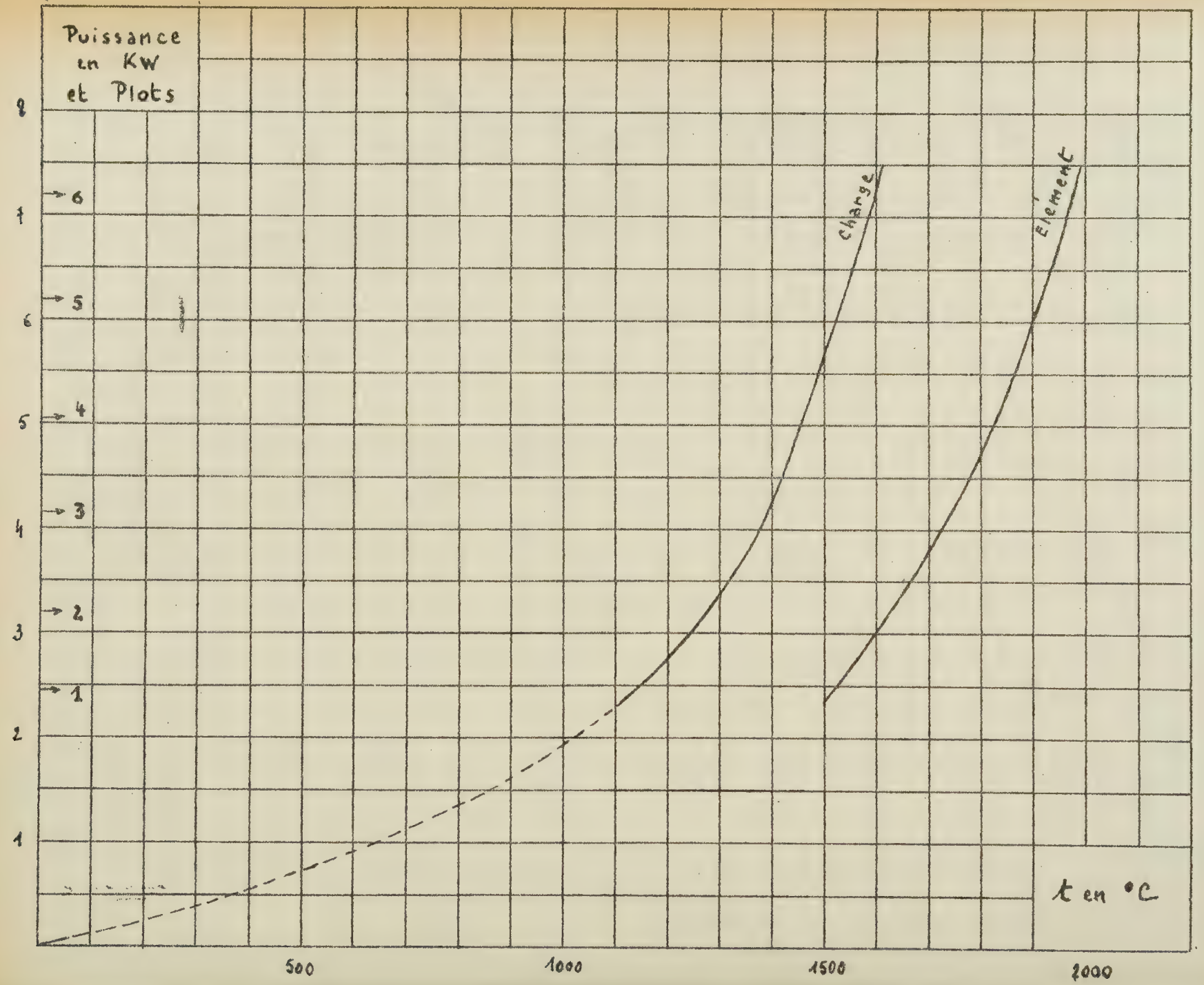

ΔT à ajouter
en °K
200
150
100
50
1200
1300
1400
1500
1600
1700
1800
1900
2000
T de brillance
en °K

FIGURE 9

Courbes de montée en température des creusets en graphite et de l'élément chauffant.

Les températures atteintes sont en abscisses et la puissance à fournir (exprimée en kilowatts) en ordonnées.

Les flèches indiquent le numéro du plot correspondant.


Puissance en KW et Plots
8
7
6
5
4
3
2
1
→ 6
→ 5
→ 4
→ 3
→ 2
→ 1
charge
Elément
t en °C
500
1000
1500
2000

sur un bloc de graphite, ont révélé des écarts très faibles, tout à fait compatibles avec la précision des appareils utilisés.

Les tableaux qui suivent résument la série de mesures réa lisées. On en tire le faisceau de courbes de la figure10 page 51 qui donne le gradient de températures dans l'enceinte. Les écrans sont numérotés de 1 à 6 en partant du centre de la cuve.

On remarque que seule la courbe relative à l'écran n° 2 fait exception à la disposition assez régulière de l'ensemble, ses deux points inférieurs étant certainement aberrants.

L'écart de température entre écrans croît régulièrement de la périphérie vers le centre de la cuve, et augmente avec la quantité de chaleur introduite, cette dernière croissance étant cependant moins nette pour les écrans proches de la paroi.

- Série de tableaux 3 -

t désigne la température intérieure de la charge.

ECRAN N° 1

t de la charge mesurée	1120	1230	1300	1390	1500
t après correction de hublot	1140	1260	1330	1425	1540
t_1 écran I	920	980	1030	1090	1200

ECRAN n° 2

t de charge mesurée	1145	1250	1355	1415	1490
t après correction de hublot	1165	1280	1390	1455	1530
t_2 écran 2	735	805	885	935	995

ECRAN N° 3

t de charge mesurée	1110	1250	1365	1430	1500
t après correction du hublot	1130	1380	1400	1465	1540
t_3 écran 3	630	705	740	775	820

ECRAN N° 4

t de charge mesurée	1135	1240	1350	1435	1505
t après correction du hublot	1155	1270	1385	1475	1550
t_4 écran 4	505	565	595	610	650

ECRAN N° 5

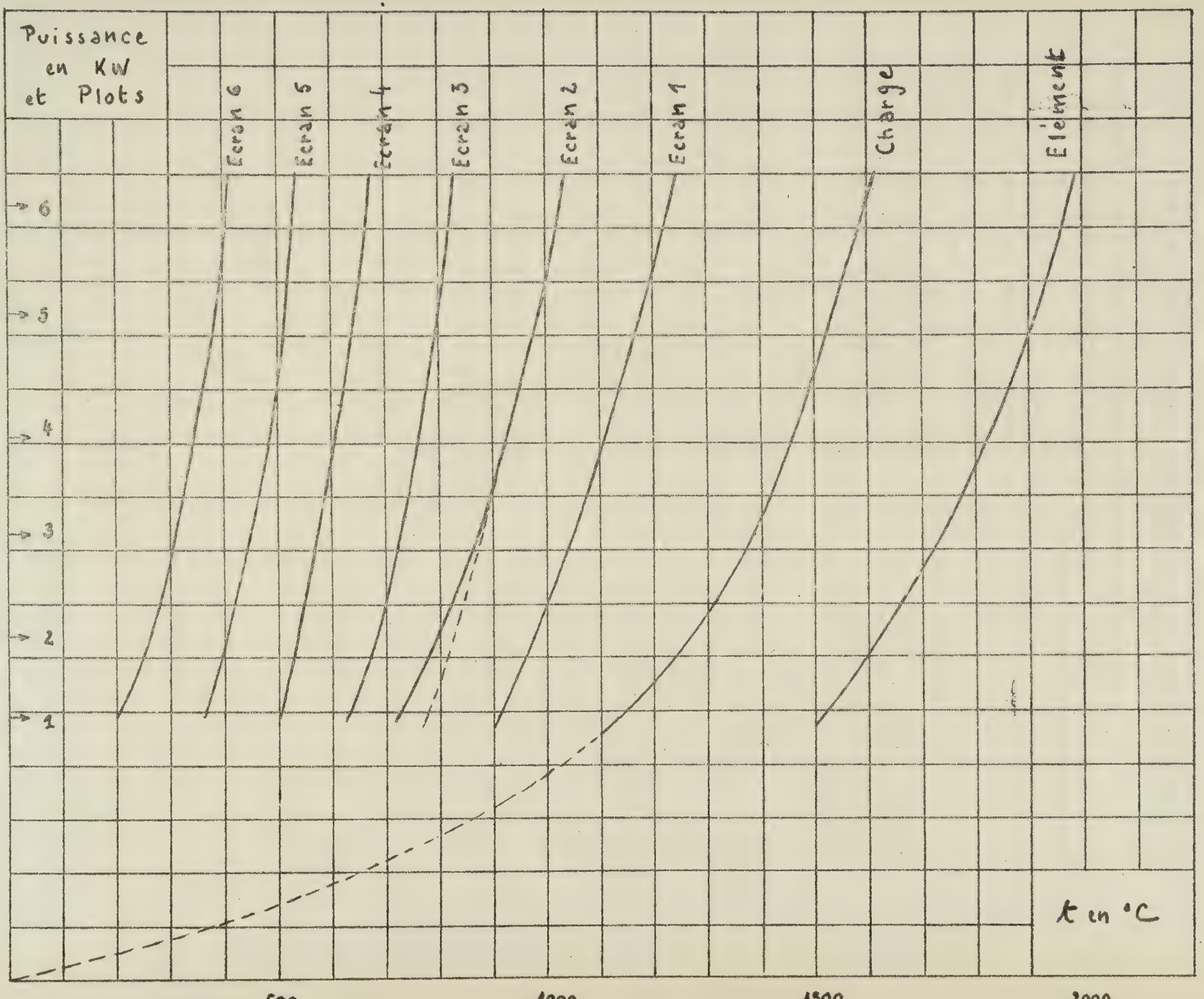
t de charge mesurée	1110	1230	1320	1505
t après correction de hublot	1130	1255	1350	1550
t_5 écran 5	360	410	430	520

ECRAN N 6

t de charge mesurée	1150	1275	1430	1500
t après correction de hublot	1170	1305	1470	1540
t_6 écran 6	215	275	340	395

FIGURE 19

Faisceau des courbes de gradient de températures dans l'enceinte du four, les températures atteintes sont en abscisses et la puissance à fournir (exprimée en kilowatts) en ordonnées.
Les flèches indiquent le numéro du plot correspondant.


Puissance en KW et Plots
Ecran 6
Ecran 5
Ecran 4
Ecran 3
Ecran 2
Ecran 1
Charge
Elément
→ 6
→ 5
→ 4
→ 3
→ 2
→ 1
8
7
6
5
4
3
2
1
500
1000
1500
2000
t en °C

- Etude de l'influence du nombre des écrans

Il est également très important de connaître les améliorations que l'on peut attendre de l'augmentation du nombre des écrans dans le rendement d'un four à vide.

Ce nombre est limité bien entendu par des impératifs de prix de revient et d'encombrement de l'appareil.

La série d'essais résumés dans les tableaux et le graphique ci après (page 53et55) donne la température de charge atteinte sur les différents plots en fonction du nombre des écrans entourant les creusets, ces écrans ayant été progressivement supprimés à partir de la périphérie vers le centre de la cuve.

On remarque l'aspect assez resserré du faisceau. L'influence du nombre des écrans est donc moins grande qu'on pouvait le supposer a priori. Les montées en température obtenues sont presque parallèles entre elles et le gain en degrés acquis sur la charge par l'adjonction d'un écran supplémentaire (30 ou 40 degrès environ) est presque constant sauf lors du passage de 1 à 2 écrans. Cette exception provient très certainement du fait qu'il s'agit de la mise en place du second écran en molybdène très réfléchissant donc plus efficace que les écrans suivants en inoxydable.

Ces courbes permettent d'extrapoler à un nombre supérieur d'écrans. On se fait une idée de la montée en température que l'on peut escompter en complétant le réseau par parallèlisme avec $\Delta t \simeq 40°C$.

TABLEAU N° 4

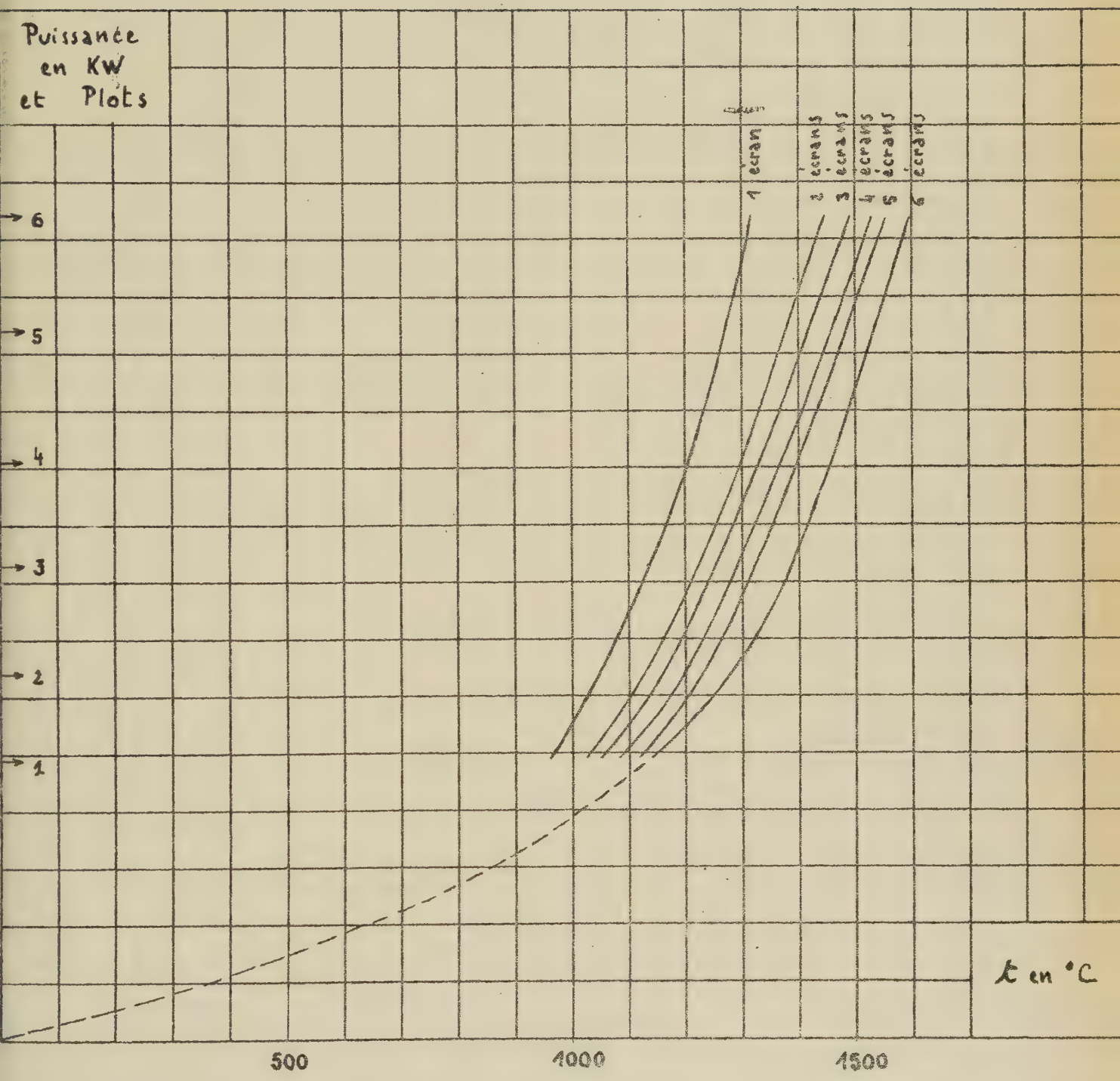
Nombre d'écrans ↓	Plots →	1 2,46kw	2 3,20kw	3 4,14kw	4 5,04kw
5	t de charge mesurée t correction de hublot	1085 1100	1200 1225	1280 1310	1360 1395
4	t mesurée t corrigée	1065 1080	1185 1210	1265 1295	1340 1375
3	t mesurée t corrigée	1035 10	1140	1230 12 5	1290
2	t mesurée t corrigée	1015 1025	1100 1130	1210 1235	1265 1295
1	t mesurée t corrigée	955 965	1040 1050	1120 1135	1175 1195

FIGURE 11

Faisceau des courbes de montée en température des creusets en graphite en fonction du nombre des écrans réflecteurs.

Les températures atteintes sont en abscisses et la puissance à fournir (exprimée en kilowatts) en ordonnées.

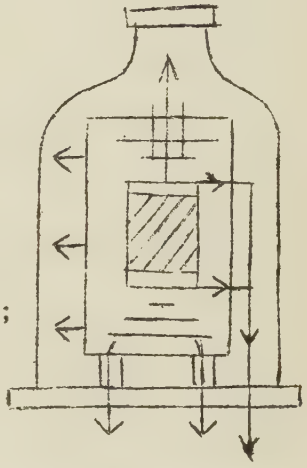
Les flèches indiquent le numéro du plot correspondant.


Puissance en KW et Plots
1 écran
2 écrans
3 écrans
4 écrans
5 écrans
6 écrans
6
5
4
3
2
1
500
1000
1500
t en °C

V

CALCUL DES COEFFICIENTS DE RAYONNEMENT

a) Séparation des pertes par conductibilité et rayonnement



Comme le montre le schéma ci-contre il y a plusieurs grandes voies d'écoulement des calories introduites dans l'enceinte du four.

A) Le rayonnement mutuel entre la charge, l'élément chauffant et l'écran n° 1, puis le rayonnement mutuel d'écran à écran ;

B) Le rayonnement direct à partir de la charge à travers les fenêtres d'amenée de courant et les hublots de mesure;

C) La conductibilité à travers les différents organes de liaison de l'ensemble des écrans et des pyramides inférieure et supérieure ;

D) La conductibilité à travers les supports de l'élément chauffant vers les électrodes refroidies.

Les calculs effectués à ce sujet ont mis en évidence les deux résultats suivants :
- la chaleur transmise par conductibilité d'écran à écran est sensiblement la même, pour un plot donné, quels que soient les deux écrans successifs considérés (ceci est également valable entre l'écran n° 6 et la cuve elle-même).

- le partage conductibilité-rayonnement peut être considéré comme constant quelqque soit le plot envisagé.

Effectuons les calculs pour le plot n° 6 pour lequel la puissance introduite correspondante est de 6200 kcal/h
elle donne les températures :

t_2 (écran 2) : 1020° C — t (charge) : 1595° C
t_1 (écran 1) : 1230° C — T (élément) : 1990° C (température réelle)

- Pertes par conductibilité dans les électrodes

On peut appliquer la formule générale : $q = \lambda S. \frac{\Delta t}{\Delta n}$

S section en m^2
$\Delta t/\Delta_n$ gradient de température en °C/m
λ coefficient de conductibilité en kcal/°C/m/h.

On a :
λ # 100 pour le molybdène
λ # 30 pour l' cier

Dans le cas des supports d'élément chauffant :
$S = 400\ mm^2$
$\Delta_n = 70$ mm
$\Delta t = 1700°$ C

d'où :

$$Q_1 = \frac{100.400.1900.10^{-6}}{7.10^{-2}} \# 1000 \text{kcal/h}$$

- Pertes par rayonnement direct

On peut en avoir un ordre de grandeur en considérant le rayonnement absolu d'une surface de creuset égale à la surface offerte par les orifices percés à travers les écrans. Ils correspondent à une surface totale de 19 cm^2. D'où une chaleur rayonnée de :

$$Q_2 = 5.19.10^{-4} \overline{18,65}^4$$

en prenant 1865°K comme température de charge et 5 comme coefficient de rayonnement absolu du graphite (ce qui correspond à une valeur par excès puisque le coefficient du corps noir est de 4,93).
On a alors :

Q_2 : 1200 kcal/h

La part réservée au rayonnement mutuel dans la région centrale est donc de :

$$Q = 6200 - (1000 + 1200) = \underline{4000 \text{kcal/h}}$$

- Pertes par conductibilité entre écrans

Dans l'écoulement thermique entre écrans s'ajoutent aux quantités précédentes les pertes par conductibilité dans les espaceurs, tiges de liaisons et entretoises. On peut appliquer la formule utilisée plus haut.

Entre l'écran 1 et l'écran 2, on a :

$\Delta t \# 200°$ C

$S = 500$ mm^2

Δ_n : 10 mm

d'où:

$$Q_3 = \frac{100.500.200.10^{-6}}{10^{-2}} \# 500 \text{ kcal/h}$$

le rayonnement mutuel des écrans porte donc sur :

$Q = 6200 - (1000 + 1200 + 500) = \underline{3500 \text{ kcal/h.}}$

En définitive on voit que la part réservée au rayonnement mutuel sur la chaleur totale Q introduite est de :

$Q \frac{4000}{6200} = 0,645\ Q$ pour la zone centrale (écran 1, charge, élément)

$Q \frac{3500}{6200} = 0,565\ Q$ pour la transmission entre écrans.

Cette représentation des phénomènes thermiques dans l'enceinte du four n'est qu'approchée. En réalité la part réservée à la conductibilité à travers les supports d'élément reste assez élevée pour les plots inférieurs et pour ceux-ci les coefficients ci-dessus sont voisins respectivement de 0,6 et 0,5. Mais, comme le montrent les calculs et les résultats exposés plus loin, la précision demeure excellente pour les plots moyens et supérieurs, ce qui justifie le choix des coefficients 0,645 et 0,565, les projets de four s'établissant toujours d'après les puissances moyennes et supérieures à utiliser.

b) Etude du rayonnement mutuel des écrans

Cette étude est faite à partir du graphique de la figure 10 page 51. Compte tenu de l'allure générale du gradient de température, la courbe relative à l'écran 2 a été modifiée suivant le tracé en pointillé qui laisse aberrants les points correspondant aux plots 1 et 2.

On en tire le tableau ci-dessous, base du calcul des coefficients de rayonnement mutuel :

TABLEAU N°

Plots	Puissance réelle kw	kcal/h	Part du rayonnement mutuel	Températures des écrans	t charge	t élément brillance
6	7,20	6200	3500	410 530 665 830 1020 1230	1590	1750
5	6,20	5300	3000	385 515 650 810 995 1190	1530	1700
4	5,05	4300	2400	345 490 625 770 930 1125	1460	1635
3	4,15	3600	2000	310 455 595 730 885 1055	1390	1580
2	3,20	2700	1500	255 410 555 680 825 980	1270	1490
	2,45	2100	1200	190 350 500 630 765 910	1130	1380

Exposé des calculs pour les différents plots

La formule générale utilisée est la formule (7) de la page31:

$$Q_{n,n-1} = \sigma_{n,n-1} \; S_{n,n-1} \left[\left(\frac{tn-1}{100}\right)^4 - \left(\frac{tn}{100}\right)^4 \right] \quad \varepsilon$$

dans laquelle les températures sont exprimées en degrés Kelvin.
Le rayonnement mutuel cuve-écran 6 est calculé en considérant simplement le rayonnement absolu de l'écran 6 :

$$Q = \sigma_6 S_6 \left(\frac{t6}{100}\right)^4$$

Les surfaces de rayonnement des différents écrans, exprimées en m^2, sont les suivantes :

Ecran 1 $S_1 = 0,092$
Ecran 2 $S_2 = 0,122$
Ecran 3 $S_3 = 0,146$
Ecran 4 $S_4 = 0,192$
Ecran 5 $S_5 = 0,232$
Ecran 6 $S_6 = 0,277$

Plot n° 6 — Q = 3500 kcal/h

$3500 = 0,092\ \sigma_{12}\ (\overline{15}^4 - \overline{12,9}^4)$ d'où $\sigma_{12} = 1,65$
$3500 = 0,122\ \sigma_{23}\ (\overline{12,9}^4 - \overline{11}^4)$ $\sigma_{23} = 2,22$
$3500 = 0,146\ \sigma_{34}\ (\overline{11}^4 - \overline{9,35}^4)$ $\sigma_{34} = 3,43$
$3500 = 0,192\ \sigma_{45}\ (\overline{9,35}^4 - \overline{8}^4)$ $\sigma_{45} = 5,22$
$3500 = 0,232\ \sigma_{56}\ (\overline{8}^4 - \overline{6,80}^4)$ $\sigma_{56} = 7,55$
$3500 = 0,277\ \sigma_6\ \overline{6,80}^4$ $\sigma_6 = 6$

Plots n° 5 — Q = 3000 kcal/h

$3000 = 0,092\ \sigma_{12}\ (\overline{14,6}^4 - \overline{12,65}^4)$ d'où $\sigma_{12} = 1,63$
$3000 = 0,122\ \sigma_{23}\ (\overline{12,65}^4 - \overline{10,8}^4)$ $\sigma_{23} = 2,06$
$3000 = 0,146\ \sigma_{34}\ (\overline{10,8}^4 - \overline{9,20}^4)$ $\sigma_{34} = 3,16$
$3000 = 0,192\ \sigma_{45}\ (\overline{9,20}^4 - \overline{7,85}^4)$ $\sigma_{45} = 4,75$
$3000 = 0,232\ \sigma_{56}\ (\overline{7,85}^4 - \overline{6,55}^4)$ $\sigma_{56} = 6,45$
$3000 = 0,277\ \sigma_6\ \overline{6,55}^4$ $\sigma_6 = 6$

Plots n° 4 — Q = 2400 kcal/h

$2400 = 0,092\ \sigma_{12}\ (\overline{13,95}^4 - \overline{12}^4)$ d'où $\sigma_{12} = 1,49$
$2400 = 0,122\ \sigma_{23}\ (\overline{12}^4 - \overline{10,4}^4)$ $\sigma_{23} = 2,22$
$2400 = 0,146\ \sigma_{34}\ (\overline{10,4}^4 - \overline{8,95}^4)$ $\sigma_{34} = 3,16$
$2400 = 0,192\ \sigma_{45}\ (\overline{8,95}^4 - \overline{7,60}^4)$ $\sigma_{45} = 4,04$
$2400 = 0,232\ \sigma_{56}\ (\overline{7,60}^4 - \overline{6,15}^4)$ $\sigma_{56} = 5,44$
$2400 = 0,277\ \sigma_6\ \overline{6,15}^4$ $\sigma_6 = 6,2$

Plots n° 3 — Q = 2000 kcal/h

$2000 = 0,092\ \sigma_{12}\ (\overline{13,25}^4 - \overline{11,55}^4)$ d'où $\sigma_{12} = 1,67$
$2000 = 0,122\ \sigma_{23}\ (\overline{11,55}^4 - \overline{10}^4)$ $\sigma_{23} = 2,06$
$2000 = 0,146\ \sigma_{34}\ (\overline{10}^4 - \overline{8,65}^4)$ $\sigma_{34} = 3,12$
$2000 = 0,192\ \sigma_{45}\ (\overline{8,65}^4 - \overline{7,25}^4)$ $\sigma_{45} = 3,72$
$2000 = 0,232\ \sigma_{56}\ (\overline{7,25}^4 - \overline{5,80}^4)$ $\sigma_{56} = 5,06$
$2000 = 0,277\ \sigma_6\ \overline{5,80}^4$ $\sigma_6 = 6,56$

Plot n° 2 Q = 1500 kcal/h

$1500 = 0,092\ \sigma_{12}\ (\overline{12,5}^4 - \overline{10,95}^4)$ d'où $\sigma_{12} = 1,68$
$1500 = 0,122\ \sigma_{23}\ (\overline{10,95}^4 - \overline{9,50}^4)$ $\sigma_{23} = 2,02$
$1500 = 0,146\ \sigma_{34}\ (\overline{9,50}^4 - \overline{8,25}^4)$ $\sigma_{34} = 2,86$
$1500 = 0,192\ \sigma_{45}\ (\overline{8,25}^4 - \overline{6,80}^4)$ $\sigma_{45} = 3,12$
$1500 = 0,232\ \sigma_{56}\ (\overline{6,80}^4 - \overline{5,25}^4)$ $\sigma_{56} = 4,95$
$1500 = 0,277\ \sigma_{6}\ (\overline{5,25}^4$ $\sigma_{6} = 6,75$

Plot n° 1 Q = 1200 kcal/h

$1200 = 0,092\ \sigma_{12}\ (\overline{11,8}^4 - \overline{10,35}^4)$ d'où $\sigma_{12} = 1,64$
$1200 = 0,122\ \sigma_{23}\ (\overline{10,35}^4 - \overline{9}^4)$ $\sigma_{23} = 2,24$
$1200 = 0,146\ \sigma_{34}\ (\overline{9}^4 - \overline{7,70}^4)$ $\sigma_{34} = 2,65$
$1200 = 0,192\ \sigma_{45}\ (\overline{7,70}^4 - \overline{6,20}^4)$ $\sigma_{45} = 3,13$
$1200 = 0,232\ \sigma_{56}\ (\overline{6,20}^4 - \overline{4,60}^4)$ $\sigma_{56} = 5,18$
$1200 = 0,277\ \sigma_{6}\ \overline{4,60}^4$ $\sigma_{6} = 8,5$

Comme on le voit plusieurs de ces coefficients sont supérieurs au coefficient de rayonnement absolu du corps noir : $\sigma_o = 4,93$. Ceci s'explique par le fait qu'il s'agit de coefficients de rayonnement mutuel et par les approximations qui ont été faites dans la représentation des phénomènes d'écoulement thermique dans l'enceinte du four. On déduit des résultats précédents 6 coefficients moyens de rayonnement mutuel, points de départ des calculs ultérieurs de températures. Leurs valeurs sont données dans le tableau récapitulatif ci-dessous (tableau n° 6, page 63).

c) Calcul du gradients de température à partir des coefficients moyens

Le calcul se fait pour les différents plots à partir de l'écran n° 6, le plus proche de la paroi de la cuve.

Plot n° 6

$3500 = 0,277.6,6.\overline{t_6/100}^4$ d'où $t_6 = 390°$ C
$3500 = 0,232.5,77.(\overline{t_5/100}^4 - \overline{6,6}^4)$ $t_5 = 550°$ C
$3500 = 0,192.4,00.(\overline{t_4/100}^4 - \overline{8,2}^4)$ $t_4 = 710°$ C
$3500 = 0,146.3,06.(\overline{t_3/100}^4 - \overline{9,8}^4)$ $t_3 = 870°$ C
$3500 = 0,122.2,14.(\overline{t_2/100}^4 - \overline{11,4}^4)$ $t_2 = 1050°$ C
$3500 = 0,092.1,63.(\overline{t_1/100}^4 - \overline{13,2}^4)$ $t_1 = 1255°$ C

Plot n° 5

$3000 = 0,277.6,6.\ \overline{t_6/100}^4$ d'où $t_6 = 365°$ C
$3000 = 0,232.5,77.\ (\overline{t_5/100}^4 - \overline{6,35}^4)$ $t_5 = 520°$ C

TABLEAU N° 6

Plots	$\sigma_{1,2}$	$\sigma_{2,3}$	$\sigma_{3,4}$	$\sigma_{4,5}$	$\sigma_{5,6}$	σ_6
6	1,65	2,22	3,43	5,22	7,55	6
5	1,63	2,06	3,16	4,75	6,45	6
4	1,49	2,22	3,16	4,04	5,44	6,2
3	1,67	2,06	3,12	3,72	5,06	6,6
2	1,68	2,02	2,86	3,12	4,95	6,7
1	1,64	2,24	2,65	3,13	5,18	8,5
σ moyens	1,63	2,14	3,06	4,00	5,77	6,6

$3000 = 0,192.4,00.\ (\overline{t_4/100}^4 - \overline{7,90}^4)$ $t_4 = 670°$ C
$3000 = 0,146.3,06.\ (\overline{t_3/100}^4 - \overline{9,40}^4)$ $t_3 = 830°$ C
$3000 = 0\ 122.2,14.\ (\overline{t_2/100}^4 - \overline{11}^4$ $t_2 = 1000°$ C
$3000 = 0,\ 092.1,63.\ (\overline{t_1/100}^4 - \overline{12,7}^4)$ $t_1 = 1195°$ C

Plot n° 4

$2400 = 0,277.6,6.\ \overline{t_6/100}^4$ d'où $t_6 = 335°$ C
$2400 = 0,232.5,77.\ (\overline{t_5/100}^4 - \overline{6,05}^4)$ $t_5 = 525°$ C
$2400 = 0,192.4,00.\ (\overline{t_4/100}^4 - \overline{7,45}^4)$ $t_4 = 620°$ C

$2400 = 0,146.3,06\ (\overline{t_3/100}^4 - \overline{8,90}^4)$ $\quad t_3 = 770°\ C$
$2400 = 0,122.2,14\ (\overline{t_2/100}^4 - \overline{10,40}^4)$ $\quad t_2 = 930°\ C$
$2400 = 0,092.1,63\ (\overline{t_1/100}^4 - \overline{12}^4)$ $\quad t_1 = 1115°\ C$

Plot n° 3

$2000 = 0,277.6,6.\ \overline{t_6/100}^4$ d'où $\quad t_6 = 305°\ C$
$2000 = 0,232.5,77\ (\overline{t_5/100}^4 - \overline{5,75}^4)$ $\quad t_5 = 445°\ C$
$2000 = 0,192.4,00.\ (\overline{t_4/100}^4 - \overline{7,15}^4)$ $\quad t_4 = 580°\ C$
$2000 = 0,146.3,06.\ (\overline{t_3/100}^4 - \overline{8,50}^4)$ $\quad t_3 = 720°\ C$
$2000 = 0,122.2,14.\ (\overline{t_2/100}^4 - \overline{9,90}^4)$ $\quad t_2 = 880°\ C$
$2000 = 0,092.1,63.\ (\overline{t_1/100}^4 - \overline{11,5}^4)$ $\quad t_1 = 1055°C$

Plot n° 2

$1500 = 0,277.6,6.\ \overline{t_6/100}^4$ d'où $\quad t_6 = 265°\ C$
$1500 = 0,232.5,77.\ (\overline{t_5/100}^4 - \overline{5,35}^4)$ $\quad t_5 = 395°\ C$
$1500 = 0,192.4,00.\ (\overline{t_4/100}^4 - \overline{6,65}^4)$ $\quad t_4 = 520°\ C$
$1500 = 0,146.3,06.\ (\overline{t_3/100}^4 - \overline{7,90}^4)$ $\quad t_3 = 650°\ C$
$1500 = 0,122.2,14.\ (\overline{t_2/100}^4 - \overline{9,20}^4)$ $\quad t_2 = 800°\ C$
$1500 = 0,092.1,63.\ (\overline{t_1/100}^4 - \overline{10,70}^4)$ $\quad t_1 = 965°\ C$

Plot n° 1

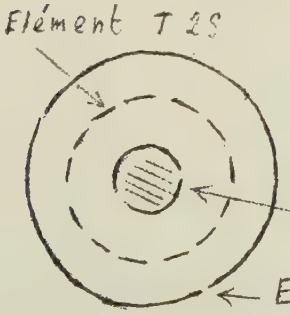
$1200 = 0,277.6,6.\ \overline{t_6/100}^4$ d'où $\quad t_6 = 235°\ C$
$1200 = 0,232.5,77.\ (\overline{t_5/100}^4 - \overline{5,05}^4)$ $\quad t_5 = 355°\ C$
$1200 = 0,192.4,00.\ (\overline{t_4/100}^4 - \overline{6,25}^4)$ $\quad t_4 = 475°\ C$
$1200 = 0,146.3,06.\ (\overline{t_3/100}^4 - \overline{7,45}^4)$ $\quad t_3 = 600°\ C$
$1200 = 0,122.2,14.\ (\overline{t_2/100}^4 - \overline{8,7}^4)$ $\quad t_2 = 740°\ C$
$1200 = 0,092.1,63.\ (\overline{t_1/100}^4 - \overline{10,10}^4)$ $\quad t_1 = 900°\ C$

Le tableau ci-dessous (tableau n° 7) donne la comparaison de ces résultats de calcul avec les températures mesurées dans l'enceinte. Il apparaît que l'erreur commise en utilisant les coefficients moyens reste dans des limites acceptables même pour les plots inférieurs.

Plots \ Ecrans		6	5	4	3	2	1
1	t mesurées	190	350	500	630	765	910
	t calculées	235	355	475	600	740	900
	Ecarts	+45	+5	-25	-30	-15	-10
2	t mesurées	255	410	555	680	825	980
	t calculées	265	395	520	650	800	965
	Ecarts	+10	-15	-35	-30	-25	-15
3	t mesurées	310	455	595	730	885	1055
	t calculées	305	445	580	720	880	1055
	Ecarts	-5	-10	-15	-10	-5	0
4	t mesurées	345	490	625	770	930	1125
	t calculées	335	525	620	770	930	1115
	Ecarts	-10	+35	-5	0	0	-10
5	t mesurées	385	515	650	810	995	1190
	t calculées	365	520	670	830	1000	1195
	Ecarts	-20	+5	+20	+20	+5	+5
6	t mesurées	410	530	665	830	1020	1230
	t calculées	390	550	710	870	1050	1255
	Ecarts	-20	+20	+45	+40	+30	+25

d) Etude du rayonnement de la région centrale

Comme nous l'avons vu plus haut, le rayonnement de la zone centrale du four est plus difficile à mettre en équation. Nous avons admis (voir page 31) les relations suivantes :



$$\rho' \frac{s}{n} \left[\left(\frac{t}{100}\right)^4 - \left(\frac{t'}{100}\right)^4 \right] = \rho S \left[\left(\frac{T}{100}\right)^4 - \left(\frac{t}{100}\right)^4 \right]$$

$$\rho'' S \left[\left(\frac{T}{100}\right)^4 - \left(\frac{t_1}{100}\right)^4 \right] + \rho' \frac{s}{n} \left[\left(\frac{t}{100}\right)^4 - \left(\frac{t_1}{100}\right)^4 \right] = Q$$

ρ coefficient de rayonnement mutuel élément/charge
ρ' : coefficient de rayonnement mutuel charge/écran 1
ρ'' " coefficient de rayonnement mutuel élément/écran 1

Nous sommes donc en présence d'un système de deux équations à 3 inconnues : ρ, ρ', ρ''.
Les autres paramètres ont pour valeurs :

$s = 0,034\ m^2$ surface de rayonnement du creuset
$2S = 2.0,015\ m^2$ surface de rayonnnement de l'élément
$n = S_T/(S_T - S) = 0,053/(0,053 - 0,015) = 1,4$
$1/n = 0,714$

On peut se faire une idée des ordres de grandeurs réciproques des coefficients inconnus ρ, ρ', ρ'',.

On a en effet les relations (voir pages 30 et 31) :

$1/\rho' = 1/r' + s/S_1(1/r_1 - 1/r0)$

$1/\rho = 1/r + S/s\ (1/r' - 1/r0)$

$1/\rho'' = 1/r + S/S_1\ (1/r_1 - 1/r0)$

prenons $r_1 = 1,6$ (voir paragraphe précédent)

$r' = 4,6$ (valeur admise pour le carbone)

$r = 1,6.$

On a alors :

$1/\rho' = 1/4,6 + 0,034/0,092\ (1/1,6 - 1/4,93)$ d'où $\underline{\rho' = 2,65}$

$1/\rho = 1/1,6 + 0,015/0,034\ (1/4,6 - 1/4,93)$ d'où $\underline{\rho = 1,58}$

$1/\rho'' = 1/1,6 + 0,015/0,092\ (1/1,6 - 1/4,93)$ d'où $\underline{\rho'' = 1,44}$

On voit que ρ et ρ'' ont des ordres de grandeur voisins. Supposons, pour simplifier le problème :

$$\rho = \rho''$$

On est ramené alors à un système de deux équations à deux inconnues :

$$\rho' s/n\left[\left(\frac{t}{100}\right)^4 - \left(\frac{t_1}{100}\right)^4 \right] = \rho S \left[\left(\frac{T}{100}\right)^4 - \left(\frac{t}{100}\right)^4 \right]$$

$$\rho S \left[\left(\frac{T}{100}\right)^4 - \left(\frac{t_1}{100}\right)^4 \right] = \rho' \frac{s}{n} \left[\left(\frac{t}{100}\right)^4 - \left(\frac{t_1}{100}\right)^4 \right] = Q$$

Ce qui peut s'écrire :

$$x\left[\left(\frac{t}{100}\right)^4 - \left(\frac{t_1}{100}\right)^4\right] = y\left[\left(\frac{T}{100}\right)^4 - \left(\frac{t}{100}\right)^4\right]$$

$$y\left[\left(\frac{T}{100}\right)^4 - \left(\frac{t_1}{100}\right)^4\right] + x\left[\left(\frac{t}{100}\right)^4 - \left(\frac{t_1}{100}\right)^4\right] = Q$$

Calculons x et y pour l'un des plots supérieurs :

Cas du plot 5

$Q = 5300.0,645 = 3400$ kcal/h
$t_1 = 1190°$ C
$t = 1530°$ C
$T = 1910°$C

Le système devient :

$$\begin{cases} x.\ (\overline{18}^4 - \overline{14,6}^4) = Y.\ (\overline{21,8}^4 - \overline{18}^4) \\ y.\ (\overline{21,8}^4 - \overline{14,6}^4) + (\overline{18}^4 - \overline{14,6}^4) = 3400 \end{cases}$$

On en tire :

$$\begin{cases} y = 0,5\ x \\ 180\ 000\ y + 60\ 000\ x = 3400 \end{cases}$$

d'où

$$x = 34/1500 = \underline{0,022}$$

$$y = 0,022.0,5 = \underline{0,011}$$

ce qui correspond à :

$$\rho = \begin{cases} \rho'' = 0,74 \\ \rho' = 0,90 \end{cases}$$

Appliquons ces valeurs de x et y aux cas des 5 autres plots. Prenons comme nouvelles inconnues :

$$x = \overline{t_1/100}^4$$

$$y = \overline{T/100}^4$$

Plot n° 6

$Q = 0,645.6200 = 4000$ kcal/h
$t = 1590°$ C

$$\begin{cases} 0,022\ (\overline{18,6}^4 - x) = 0,011\ (y - \overline{18,6}^4) \\ 0,011\ (y - x) + 0,022\ (\overline{18,6}^4 - x) = 4000 \end{cases}$$

$$- 0,022\ x - 0,011\ y = -3960$$
$$- 0,033\ x + 0,011\ y = 1360$$

$$0,055\ x = 2600 \qquad \text{d'où } t_1 = 1200° \text{ C}$$
$$0,011\ y = 1360 + 0,033.\ 47300 \qquad T = 2000° \text{ C}$$

Plot n° 4

$Q = 0,645.4300 = 2800$ kcal/h
$t = 1460°$ C

$$\begin{cases} 0,022\ (\overline{17,3}^4 - x) = 0,011\ (y_4 - \overline{17,3}^4) \\ 0,011\ (y - x) + 0,022\ 117,3^4 - x) = 2800 \end{cases}$$

$$- 0,022\ x - 0,011\ y = -2950$$
$$- 0,033\ x + 0,011\ y = 830$$

$$0,055\ x = 2120 \qquad \text{d'où } t_1 = 1130° \text{ C}$$
$$0,011\ y = 830 + 0,033.\ 38600 \qquad T = 1820° \text{ C}$$

Plot n° 3

$Q = 0,645.3600 = 2300$ kcal/h
$t = 1390°$ C

$$\begin{cases} 0,022\ (\overline{16,6}^4 - x) = 0,011\ (y - \overline{16,6}^4) \\ 0,011\ (y - x) + 0,022\ (\overline{16,6}^4 - x) = 2300 \end{cases}$$

$$- 0,022\ x - 0,011\ y = -2500$$
$$- 0,033\ x + 0,011\ y = 630$$

$$0,055\ x = 1870 \qquad \text{d'où } t_1 = 1090° \text{ C}$$
$$0,011\ y = 630 + 0,033.34\ 000 \qquad T = 1730° \text{ C}$$

Plot n° 2

$Q = 0,645.2700 = 1740$ kcal/h
$t = 1270°$ C

$$\begin{cases} 0,022\ (\overline{15,4}^4 - x) = 0,011\ (y - \overline{15,4}^4) \\ 0,011\ (y - x) + 0,022\ (\overline{15,4}^4 - x) = 1740 \end{cases}$$

$- 0,022\ x - 0,011\ y = -1840$

$- 0,033\ x + 0,011\ y = 510$

$0,055\ x = 1330$ d'où $t_1 = 980°$ C

$0,011\ y = 510 + 0,033\ \ 24\ 400$ $T = 1590°$ C

Plot n° 1

$Q = 0,645.2100 = 1350$ kcal/h
$t = 1130°$ C

$$\begin{cases} 0,022\ (\overline{14}^4 - x) = 0,011\ (y - \overline{14}^4) \\ 0,011\ (y - x) + 0,022\ (\overline{14}^4 - x) = 1350 \end{cases}$$

$- 0,022\ x - 0,011\ y = -1265$

$- 0,033\ x + 0,011\ y = 505$

$0,055\ x = 760$ D'où $t_1 = 810°$ C

$0,011\ y = 505 + 0,033\ \ 13800$ $T = 1450°$ C

Le tableau ci-après (tableau n° 8 page 70) donne la comparaison de ces valeurs trouvées par la calcul avec les températures mesurées dans l'enceinte. On voit que seuls les plots inférieurs donnent avec les coefficients choisis des résultats légèrement aberrants.

TABLEAU n° 8

Plots	t_1 °C calculée	mesurée	écart	T° C calculée	mesurée	écart
6	1200	1230	- 30	2000	1980	+ 20
4	1130	1125	+ 5	1820	1825	- 5
3	1090	1050	+ 40	1730	1740	- 10
2	980	980	0	1590	1620	- 30
1	810	910	-100	1450	1510	- 60

VI

ESSAI DE GENERALISATION ET CONCLUSION

a) Application à un four de capacité plus grande

Comme nous l'avons vu lors de l'établissement des équations (page 32), le rayonnement mutuel de la région centrale du four obéit à un système du type :

$$f(t, t_1, T) = 0$$
$$g(t, t_1, T, Q) = 0$$

Lors de l'étude d'un projet de four, seule la température de la charge est connue. C'est une des données fondamentales. Tel qu'il est le système ne peut donc pas être résolu à moins d'y ajouter une relation supplémentaire ou de déterminer indépendemment l'une des trois variables.

C'est à cette dernière méthode que l'on a recours. L'expérience de ces dernières années nous a montré en effet qu'il était possible par référence aux prototypes mis au point au laboratoire de déterminer avec une bonne approximation la puissance nécessaire pour obtenir une température de charge donnée dans une enceinte dont on s'est fixé à l'avance les principales données géométriques. Cette puissance une fois fixée, la détermination exacte des caractéristiques de l'élément chauffant est aisée.

On connaît donc les valeurs des surfaces de rayonnement s, S, S_1 de la charge, de l'élément chauffant et du premier écran. On peut déterminer la valeur du coefficient n.

Si l'on suppose généralisable à d'autres fours du même type, mais de capacité différente, les résultats admis plus haut pour le four étudié, on obtient la valeur de Q en appliquant le coefficient 0,645 à la puissance réellement utilisée, et on peut déterminer la valeur des paramètres x y du système d'équations de la page 67 en conservant :

$$\rho = \rho'' = 0,74$$
$$\rho' = 0,90$$

On peut alors calculer avec une approximation suffisante t_1 et T. Connaissant t_1, on déduit les autres températures d'écrans en appliquant la formule du rayonnement mutuel (formule 7, page 31).

Ces renseignements sont précieux pour la mise au point technique du prototype. Ils permettent en particulier de décider éventuellement de la modification du nombre des écrans en molybdène.

Appliquons partiellement cette méthode au cas de l'un des fours de grande capacité mis au point au Laboratoire de Physique du Métal.

Ce four, utilisé principalement pour le frittage des carbures métalliques, assure une température de 1460° C sur la charge (correction de hublot faite) avec une puissance réelle de 10 kw, soit 8500 kcal/h. Aucune mesure n'a été faite dans le domaine du gradient de température mais l'on sait néanmoins qu'à la température t précédente correspondent :

sur l'élément θ_λ (brillance) = 1640° C
soit T (vraie) = 1770° C

sur l'écran 1 t_1 = 1180° C

Les données géométriques sont les suivantes :

$S = 0,034\ m^2$
$s = 0,077\ m^2$
$S_1 = 0,218\ m^2$
$I/n = 0,805$

On a d'autre part :

$$Q = 0,645.8500 = 5500 \text{ kcal/h.}$$

On peut donc écrire comme à la page59:

$$\begin{cases} 0,9.0,077.0,805.(\overline{17,3}^4 - x) = 0,74.0,034.(y - \overline{17,3}^4) \\ 0,74.0,034.(y - x) + 0,9.0,077.0,805.(\overline{17,3}^4 - x) = 5500 \end{cases}$$

$$\begin{cases} 0,056.(90000-x) = 0,025.(y - 90000) \\ 0,025.(y - x) + 0,056.(90000 - x) = 5500 \end{cases}$$

$$- 0,056\,x - 0,025\,y = - 7200$$
$$- 0,018\,x + 0,025\,y = 500$$

$$0,137\,x = 6700 \qquad \text{d'où} \qquad t_1 = 1220° \text{ C}$$
$$0,025\,y = 500 + 0,081.49000 \qquad T = 1790° \text{ C}$$

On voit que les écarts avec les valeurs mesurées sont respectivement de 40° C pour t_1 et de 20° C pour T.

Ces écarts peuvent être considérés comme satisfaisants en regard de l'empirisme auquel il était fait allusion au début de cet exposé.

b) Extrapolation à une température supérieure

Appliquons les résultats du chapitre précédent au cas d'une température de charge de 2000° C.

Par extrapolation de la courbe de montée en température (figure 9 , page 47) on obtient (voir page 74) la puissance à fournir soit :

$W = 15$ kw

ou $Q = 12900$ kcal/h.

- rayonnement de la région centrale

On a : $Q = 0,645 . 12900 = 8300$ kcal/h.

d'où le système :

$$\begin{cases} 0,022\ (\overline{22,7}^4 - x) = 0,011.\ (y - \overline{22,7}^4) \\ 0,011.(y - x) + 0,022.(\overline{22,7}^4 - x) = 8300 \end{cases}$$

$$\begin{cases} 0,022.\ (265000 - x) = 0,011.\ (y - 265000) \\ 0,011.\ (y - x) + 0,022.\ (265000 - x) = 8300 \end{cases}$$

$$- 0,022\ x - 0,011\ y = - 8700$$

$$- 0,033\ x + 0,011\ y = 2500$$

$0,055\ x = 6200$ d'où $t_1 = 1560°$ C

$0,011\ y = 2500 + 0,033 . 113000$ $T = 2470°$ C

En extrapolant la courbe de montée en température de l'élément chauffant, on trouve effectivement T de l'ordre de 2 500° C.

Ce résultat exclut l'utilisation d'un élémnnt en molybdène. L'obtention de 2000° C sur la charge nécessiterait donc pour ce prototype l'étude d'un nouveau résistor en tungstène

- Rayonnement mutuel des écrans

On a :

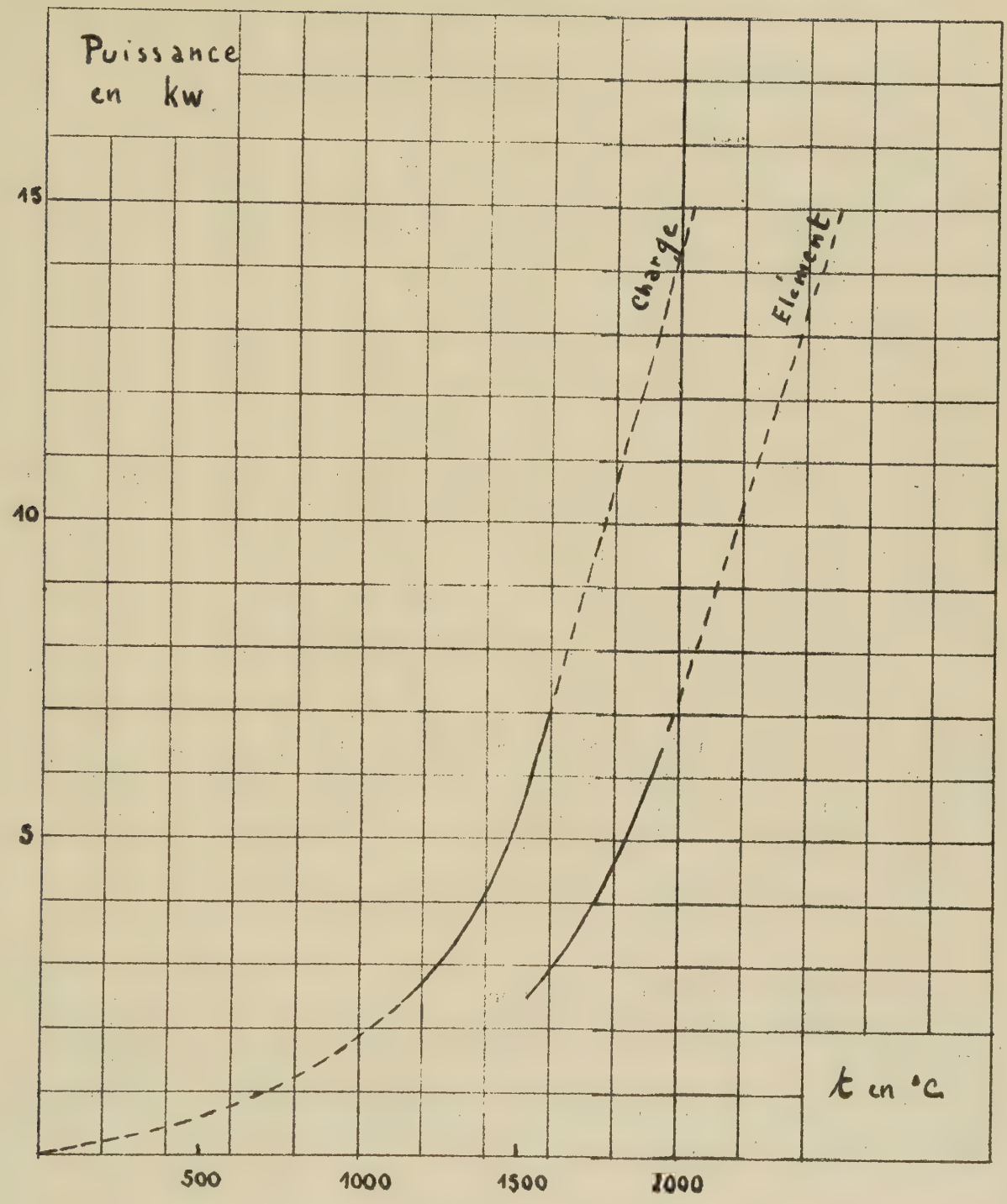
$Q = 0,565 . 12900 = 7300$ kcal/h

FIGURE 12

Extrapolation des courbes de montée en température des creusets en graphite et de l'élément chauffant.

Les températures atteintes sont en abscisses.

La puissance à fournir, exprimée en kilowatts, est en ordonnées.


Puissance
en kw
15
10
5
Charge
Elément
t en °C
500
1000
1500
2000

d'où la série d'équations :

$7300 = 0,092.1,63.(\overline{18,3}^4 - x)$

$x = 113000 - 49000 = 64000$ d'où $t_2 = 1320°$ C

$7300 = 0,122 ; 2,14.(64000 - x)$

$x = 64000 - 28000 = 36000$ d'où $t_3 = 1110°$ C

$7300 = 0,146.3,06.(36000 - x)$

$x = 36000 - 16000 = 20\,000$ d'où $t_4 = 920°$ C

$7300 = 0,192.4,00.(20000 - x)$

$x = 20000 - 9500 = 10\,500$ d'où $t_5 = 740°$ C

$7300 = 0,232.5,77.(10500 - x)$

$x = 10500 - 5500 = 5000$ d'où $t_6 = 570°$ C

Il est intéressant de comparer cette dernière température à celle que donne le calcul du rayonnement direct de l'écran n° 6 vers la cuve :

$7300 = 0,277.6,6.x$

$x = 4000$ d'où $t'_6 = 530°$ C

On voit qu'on aboutit à un écart de 40° C, ce qui est acceptable.

Les températures calculées font apparaître la nécessité de prévoir dans ce cas particulier trois écrans en molybdène au lieu de deux. Etant donné d'autre part la température du dernier écran, il faudrait, pour un tel four, étudier très soigneusement le système de refroidissement de l'enceinte et des électrodes.

La méthode que nous proposons n'a ni la prétention ni la rigueur d'une étude mathématique des phénomènes thermiques. Elle doit simplement constituer un outil commode pour éviter le recours, trop fréquent, aux tatonnements dans la mise au point technique des fours à vide sans réfractaire du type de ceux utilisés au Laboratoire de Physique du Métal depuis plusieurs années.

TABLE DES ILLUSTRATIONS

FIGURE		Pages
1	Vue d'ensemble du four	5
2	Schéma de l'installation de vide	9
3	Coupe schématique du four	13
4	Schéma de l'élément chauffant	15
5	Dessin éclaté du four	17
6	Graphique de correction d'absorbtion	39
7	Courbe donnant le coefficient d'absorbtion du molybdène	45
8	Graphique de correction de température de brillance	45 ter
9	Courbes de montée en température	47
10	Faisceau des courbes du gradient de températures	51
11	Faisceau des courbes donnant l'influence du nombre des écrans	55
12	Extrapolation des courbes de montée en température	75

DEUXIEME THESE

Propositions données par la Faculté

THEORIE DU FRITTAGE EN PHASE SOLIDE

VU : Les membres du Jury
MM. BERNARD R.
BOUTILLIER
EYRAUD

VU ET APPROUVE
Le doyen de la Faculté des Sciences
GAUTHIER

Vu et accordé le permis d'imprimer

LYON, le 28 septembre 1960

Le Recteur
Président du Conseil de l'Université,

A. ALLIX